



**Universidad Nacional Mayor de San Marcos**

**Universidad del Perú. Decana de América**

Dirección General de Estudios de Posgrado

Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y  
Geográfica  
Unidad de Posgrado

**Condiciones geo-ambientales y su influencia en el  
comportamiento dinámico de los suelos de la ciudad de  
Ica**

**TESIS**

Para optar el Grado Académico de Doctora en Ciencias  
Ambientales

**AUTOR**

Yesenia Isabel BERNAL ESQUIA

**ASESOR**

Dr. Hernando Jhonny TAVERA HUARACHE

Lima, Perú

2019



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

## Referencia bibliográfica

---

Bernal, Y. (2019). *Condiciones geo-ambientales y su influencia en el comportamiento dinámico de los suelos de la ciudad de Ica*. Tesis para optar el grado de Doctora en Ciencias Ambientales. Unidad de Posgrado, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú.

---

## **HOJA DE METADATOS COMPLEMENTARIOS**

**CODIGO ORCID DEL AUTOR:** No

**CODIGO ORCID DEL ASESOR:** Hernando Tavera 6507390191

**DNI:** 42672570

**GRUPO DE INVESTIGACIÓN:** Ciencias de la Tierra solida

**INSTITUCIÓN QUE FINANCIA PARCIAL O TOTALMENTE LA INVESTIGACIÓN:** Instituto Geofísico del Perú (IGP)

**UBICACIÓN GEOGRÁFICA DONDE SE DESARROLLÓ LA INVESTIGACIÓN. DEBE INCLUIR LOCALIDADES Y COORDENADAS GEOGRÁFICAS**

La ciudad de Ica, provincia y departamento de Ica

Coordenadas: UTM 421284E, 8445073N Zona 18

**AÑO O RANGO DE AÑOS QUE LA INVESTIGACIÓN ABARCÓ:**

Desde Agosto- 2015 a Feb-2019



## ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS



**UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS**

Universidad del Perú, Decana de América

**FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA**

UNIDAD DE POSGRADO



### ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

SUSTENTACIÓN PÚBLICA

En la Universidad Nacional Mayor de San Marcos-Lima, a los once días del mes de abril del 2019, siendo las 16:00 horas, se reúnen los suscritos miembros del JURADO EXAMINADOR DE TESIS, nombrado mediante Dictamen N.º 206/UPG-FIGMMG/2019 del 27 de marzo del 2019, con la finalidad de evaluar la sustentación oral de la siguiente tesis:

#### TÍTULO

**«CONDICIONES GEO-AMBIENTALES Y SU INFLUENCIA EN EL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LOS SUELOS DE LA CIUDAD DE ICA»**

Que, presenta la Mag. **YESENIA ISABEL BERNAL ESQUIA**, para optar el **GRADO ACADÉMICO DE DOCTORA EN CIENCIAS AMBIENTALES**.

El secretario del Jurado Examinador de la Tesis, analiza el expediente N.º 06311-FIGMMG-2013 del 23 de agosto del 2013, en el marco legal y Estatutario de la Ley Universitaria, acreditando que tiene todos los documentos y cumplió con las etapas del trámite según el «Reglamento de los Estudios de Maestría y Doctorado».

Luego de la Sustentación de la Tesis, los miembros del Jurado Examinador procedieron a aplicar la escala descrita en el Art. 61 del precitado Reglamento, correspondiéndole a la graduando la siguiente calificación:

*Muy bueno (18)*

Habiendo sido aprobada la sustentación de la Tesis, el Presidente recomienda a la Facultad se le otorgue el **GRADO ACADÉMICO DE DOCTORA EN CIENCIAS AMBIENTALES** a la Mag. **YESENIA ISABEL BERNAL ESQUIA**.

Siendo las 17:00 horas, se dio por concluido al acto académico

*[Firma]*  
DR. NÉSTOR ALFONSO TÉVES RIVAS  
Presidente

*[Firma]*  
DR. ALDO ALFONSO ALVÁN DE LA CRUZ  
Secretario

*[Firma]*  
DR. NEIL SANDRO ALATA OLIVARES  
Miembro

*[Firma]*  
DR. SERGIO BYRON MORERA JULCA  
Miembro

*[Firma]*  
DR. HERNANDO JHONNY TAVERA HUARACHE  
Asesor

**DEDICATORIA.**

*A mis padres, Carlos y Ninfa*

*A mis hijos Esteban y Benjamín*

*A Dios por ser mi fortaleza*

## **AGRADECIMIENTO**

Deseo expresar mi agradecimiento a la Universidad Nacional Mayor de San Marcos (UNMSM) a través de la Unidad de Post-Grado de la facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica (FIGMMG), y en especial al Doctor Carlos Francisco Cabrera Carranza, por la formación recibida y ser parte de la escuela de Doctorado de Ciencias Ambientales.

Del mismo modo, mi reconocimiento al Instituto Geofísico del Perú (IGP), por darme la oportunidad de desarrollarme como profesional y a su máxima autoridad, el Dr. Hernando Tavera por sus valiosos aportes, apoyo y confianza para asesorarme en la preparación del presente estudio.

De igual manera agradecer a los doctores Hugo Perfettini, Marc Wathelet, Bertrand Guillier y al Msc Javier Lermo, quienes me apoyaron en forma incondicional, para capacitarme en la ejecución de los procedimientos geofísicos para el estudio de suelos.

Expreso mi sincero agradecimiento a las personas que de una u otra manera me colaboraron en la elaboración de esta tesis. A David Portugal que siempre me apoyo sin importar la decisión que pudiera tomar y a mis hijos por ser mi motor y motivo, y sobre todo a Dios, quien es mi fortaleza y esperanza de ser cada vez mejor.

A los compañeros del postgrado, con quienes compartí horas de trabajo y discusiones durante el desarrollo de los cursos que son parte de los estudios de doctorado, gracias por su amistad y motivación. Asimismo, va mi agradecimiento al personal de la Oficina de coordinación de la unidad del Post

Grado la Srta. Mary Anaya y Sr. Alexander Luyo, por su amable colaboración durante el desarrollo de todos los trámites administrativos de la Universidad. Del mismo modo, mi agradecimiento al personal de la Unidad de ingeniería del IGP por su apoyo, en especial al Dr. Juan Carlos Villegas y a los Ingenieros Wilfredo Sulla, Javier Oyola y Lucy Arredondo.

Asimismo, mi agradecimiento al jurado revisor de la presente tesis, Dr. Neil Sandro Alata Olivares, Dr. Sergio Byron Morera Julca y Dr. Hernando Tavera, que revisaron y brindaron comentarios para el perfeccionamiento de este estudio. Finalmente, hago extensivo estos agradecimientos a mis profesores de la Escuela de Doctorado de la FIGMMG de la UNMSM, en especial a la Dra. Margarita Pajares Flores por sus enseñanzas de las metodologías de investigación y aliciente para seguir adelante.

## INDICE

RESUMEN.....	xv
ABSTRACT .....	xvi
CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN .....	1
1.1. UBICACIÓN DEL AREA DE ESTUDIO .....	2
1.2. SITUACIÓN PROBLEMÁTICA.....	5
1.3. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA .....	11
1.3.1. Problema general.....	11
1.3.2. Problemas específicos .....	11
1.4. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN .....	11
1.5. ANTECEDENTES DEL ESTUDIO.....	12
1.6. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN .....	14
1.6.1. Objetivo General.....	14
1.6.2. Objetivos específicos .....	14
CAPITULO 2: MARCO TEÓRICO .....	16
2.1. MARCO FILOSÓFICO .....	16
2.2. MARCO GEOAMBIENTAL.....	16
2.2.1. Ambiente geológico .....	16
2.2.2. Ambiente geomorfológico .....	17
2.2.3. Ambiente geodinámico .....	18
2.2.4. Ambiente geotécnico .....	20
2.3. MARCO TECTÓNICO .....	21
2.3.1. Tectónica regional y local.....	21
2.3.1.1. Sismicidad.....	24
2.3.1.2. Peligro sísmico .....	27
2.3.2. Modelo estructural de la “CUENCA DE ICA” .....	30
2.4. MARCO NORMATIVO .....	31
2.4.1. Norma Sismoresistente E.030 (2018) .....	31
2.4.2. Zonificación del Perú .....	32
2.4.3. Clasificación de los tipos de suelos.....	34

2.4.4. Comportamiento dinámico de los suelos.....	35
2.4.5. Zonificación sísmica de suelos.....	37
2.5. MARCO CONCEPTUAL.....	38
2.5.1. Propagación de las ondas sísmicas.....	38
2.5.2. Propiedades dispersivas de las ondas Rayleigh .....	39
2.5.3. Vibraciones ambientales.....	41
2.5.4. Métodos geofísicos de exploración .....	44
2.5.5. Terminología.....	44
CAPITULO 3: HIPÓTESIS Y VARIABLES .....	46
3.1. Hipótesis .....	46
3.1.1. Hipótesis general .....	46
3.1.2. Hipótesis específicas .....	46
3.2. VARIABLES .....	46
3.2.1. Identificación de las variables .....	46
3.2.2. Operacionalización de las variables.....	50
3.2.3. Matriz de consistencia .....	52
CAPITULO 4: METODOLOGÍA .....	54
4.1. Metodologías para el tratamiento de los datos geofísicos .....	54
4.1.1. Caracterización dinámica del suelo.....	54
4.1.1.1. Cocientes espectrales H/V .....	54
4.1.2. Caracterización física del suelo.....	55
4.1.2.1. Método F-K .....	55
4.1.2.2. Métodos MASW y MAM .....	55
4.1.2.3. Método Gravimétrico .....	56
4.1.3. Inversión y correlación de los resultados .....	56
4.2. Tipo y diseño de la investigación.....	58
4.3. Unidad de análisis.....	58
4.4. Población del estudio .....	58
4.4.1. Tamaño de la muestra .....	59
4.4.2. Selección de la muestra.....	59
CAPITULO 5: PROCESAMIENTO DE LOS DATOS DE CAMPO .....	60
5.1. Método de razones espectrales.....	60
5.1.1. Adquisición de datos.....	60

5.1.2. Procesamiento de la información .....	62
5.2. Métodos sísmicos MASW-MAM .....	64
5.2.1. Adquisición de datos.....	64
5.2.2. Procesamiento de la información .....	67
5.3. Método sísmicos F-K.....	69
5.3.1. Adquisición de datos.....	69
5.3.2. Procesamiento de la información .....	72
5.4. Método gravimétrico .....	74
5.4.1. Adquisición de datos.....	74
5.4.2. Procesamiento de la información .....	74
CAPITULO 6: RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	77
6.1. Características dinámicas del suelo.....	77
6.1.1. Distribución de las frecuencias predominantes del suelo .....	77
6.1.2. Amplificaciones máximas relativas (Ar).....	81
6.1.3. Distribución Frecuencia-Acimut de la energía ambiental inducida al subsuelo.....	83
6.1.4. Sectorización de los suelos en función de su periodo dominante (To) .....	85
6.2. Caracterización física del suelo .....	88
6.2.1. Perfil de velocidad de los suelos de la ciudad de Ica .....	88
6.3. Geomorfología de la cuenca de Ica bajo la ciudad de Ica.....	97
6.2.1. Método gravimétrico .....	97
6.4. Zonificación sísmica de los suelos de la ciudad de Ica.....	100
6.5. Discusión .....	103
CONCLUSIONES .....	111
RECOMENDACIONES.....	114
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	114

## INDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Mapa catastral y geológico de la ciudad de Ica. ....	4
<b>Figura 2.</b> Efectos del suelo, que amplifican el sacudimiento en superficie, puesto en evidencia con la amplitud del registro sísmico obtenido sobre roca y sedimentos. Dependiendo de las características de las estructuras, y su relación con el suelo, estas pueden ser afectadas o colapsar. Fuente: IGP, 2015. ....	6
<b>Figura 3.</b> a) Imagen que evidencia la proximidad de dunas (depósitos de arena) al área urbana de Ica. b) Imagen panorámica del valle de Ica, donde se resalta las estribaciones andinas y las dunas. Fuente: Gómez et al. (2013). ....	7
<b>Figura 4.</b> Depósitos eólicos cubriendo parcialmente algunas viviendas ubicadas a 1.5km al Noroeste de Ica, Urb. Santa Rosa. ....	8
<b>Figura 5.</b> En el AA.HH. La Victoria se ubica una laguna natural de 4.5m de profundidad, la cual viene siendo rellenada por material antrópico con la finalidad de ser ocupada. Fuente: Gómez et al. (2013). ....	8
<b>Figura 6.</b> Terraplenes en ambas márgenes del río Ica. La acumulación de material de origen antrópico afecta dichas estructuras. ....	9
<b>Figura 7.</b> El desborde del Río Ica durante El Niño ocurrido en el año 1998, causó la inundación de las principales céntricas calles de la ciudad de Ica, llegando hasta la plaza central que queda a 500 metros del cauce del río. Fuente: Imágenes tomadas de Rosell (2002). ....	10
<b>Figura 8.</b> Sectorización a partir de la capacidad portante del suelo de Ica. Fuente: INDECI. ....	20
<b>Figura 9.</b> Mapa con los elementos tectónicos ubicados a ambos extremos de su margen continental y/o oceánico. Fuente: Imagen tomada de Bernal y Tavera (2002) 22	
<b>Figura 10.</b> Distribución de la actividad sísmica, para el periodo de 1960-2017 ( $M \geq 4.0$ ). Sobre el mapa se resalta la ubicación de la ciudad de Ica. ....	23
<b>Figura 11.</b> Intensidades sísmicas regionales (MM), para eventos ocurridos en 1942 y 1996. Fuente: IGP. ....	25
<b>Figura 12.</b> Intensidades sísmicas regionales (MM), para el evento ocurrido en el 2007. Fuente: Tavera y Bernal (2007). ....	26
<b>Figura 13.</b> Mapa del departamento de Ica con la distribución de los valores de aceleración para periodos de retorno de 500 años en $\text{cm}/\text{seg}^2$ . El rectángulo indica la ubicación de la ciudad de Ica. ....	29



<b>Figura 14.</b> Esquema de la cuenca del río Ica, cuya pendiente define la parte alta, media y baja de la cuenca. Fuente: Olivares et.al. (1994).....	31
<b>Figura 15.</b> Zonas sísmicas, propuestas por la Norma E.030, a partir del mapa de peligro sísmico. El rectángulo indica la ubicación de la ciudad de Ica.....	33
<b>Figura 16. a)</b> Edificaciones destruidas, por estar construidas sobre suelos blandos de constitución lacustres. En este caso se experimenta fenómenos de resonancia entre el suelo-estructura a consecuencia del terremoto de Michoacán, México 1985 (8.1 Mw). Fuente: <a href="https://elpais.com/elpais/2015/09/17/album/1442519472_091112.html">https://elpais.com/elpais/2015/09/17/album/1442519472_091112.html</a> .....	36
<b>Figura 16. b)</b> Viviendas destruidas por asentarse sobre suelos blandos con presencia de alto nivel freático. Obsérvese los procesos de licuación de suelos como consecuencia del terremoto de Pisco 2017 (8.0 Mw).....	36
<b>Figura 17.</b> Esquema del movimiento de las partículas de las ondas de cuerpo y superficiales. Fuente: Imagen tomada de Sauter (1989).....	39
<b>Figura 18.</b> Esquema del movimiento de la partícula en profundidad, su relación con la frecuencia y la representación gráfica de la dispersión. Fuente: SESAME (2009). ..	40
<b>Figura 19. a)</b> Imágenes de registro de vibraciones ambientales obtenidas en puntos ubicados en zonas donde el ruido de fondo presentan mínimas y mayores amplificaciones. Componentes: V, NS y EO. ....	42
<b>Figura 19. b)</b> Registro de una señal sísmica obtenida en la Ciudad de Ica, donde se extrajo el ruido sísmico de fondo o vibraciones continuas del subsuelo registrado en el punto de observación. ....	43
<b>Figura 20.</b> Mapa geológico de la ciudad de Ica. Puntos negros, registros de vibración ambiental; rombos en amarillo, registros gravimétricos; triángulos amarillos y verdes, arreglos sísmicos circulares; LS01-LS03, arreglos sísmicos lineales y A-A', indica la orientación del perfil gravimétrico. ....	61
<b>Figura 21.</b> Procesamiento de los registros de vibración ambiental. En el extremo superior se define las ventanas utilizadas para el análisis espectral y en el inferior, la curva media de los resultados H/V, con su respectiva grafica de variación azimutal de la energía inducida al medio para cada rango de frecuencia definido. ....	63
<b>Figura 22.</b> Generación de ondas sísmicas con fuente artificial (comba), del análisis de los registros obtenidos mediante el método de MASW, obtenemos su respectiva curva de dispersión. ....	64
<b>Figura 23.</b> Equipos utilizados en la toma de datos de MASW. ....	65

**Figura 24.** Registros sísmicos generados por una fuente externa. a) Con bajo contenido de ruido ambiental; es decir, de alta calidad. b) Con alto contenido de ruido ambiental.....66

**Figura 25.** a) Curva de dispersión y b) Perfil unidimensional de  $V_s$  obtenida de la inversión de la curva.....68

**Figura 26.** Frente de ondas planas que atraviesan el arreglo circular de diferentes radios. Fuente: modificado de Ohrnberger et al. (2012).....70

**Figura 27.** a) Sincronización de los 10 sensores sísmicos Guralp utilizados en este estudio, con sus respectivos registradores Reftek de 24 bits. b) Disposición de los equipos considerando el arreglo sísmico circular, realizado en el Campo Ferial de la ciudad de Ica. ....71

**Figura 28.** a) Arreglo circular de 30 metros de radio; b) Muestra la función de respuesta con un pico global en el centro y otros picos locales, que representan las contribuciones de la energía superior e inferior ( $K_{min}$ , y  $K_{max}$ ), dados en un espacio bidimensional  $K_x$  y  $K_y$ ; c) Muestra la función de respuesta para diferentes acimuts (direcciones de incidencia del frente de onda), el pico central denota dos frentes de onda ( $K_{min}$ , y  $K_{max}$ ); d) Las dimensiones y geometría del arreglo definen las curvas de resolución (línea discontinua, delimitando las áreas de mayor resolución).....73

**Figura 29.** Arriba: Esquema sobre la diferencia de las anomalías regionales y las anomalías de Bouguer (gravedad) observadas, a fin de obtener la anomalía residual de Bouguer (Álvarez 2003). Abajo: Cortes de la elevación topográfica, anomalías residuales y la sobre posición de las curvas de la anomalía de Bouguer observadas y la calculada.....76

**Figura 30.** Mapa con la distribución de valores de frecuencias  $F_0$  ( $F < 1.0\text{Hz}$ ). Los números en rojo representan a puntos con amplificaciones mayores e iguales a 4 veces. ....78

**Figura 31.** Mapa con la distribución de valores de frecuencias  $F_1$  ( $F \geq 1.0\text{Hz}$ ). Los números de mayor tamaño representan a valores mayores e iguales a 2.0 Hz y en rojo, aquellos que presentan amplificaciones mayores e iguales a 4 veces.....80

**Figura 32.** Curvas características de cocientes espectrales, obtenidas en puntos ubicados hacia el extremo derecho (C,D) e izquierdo (A,B) del río Ica (Figura 31). En cada gráfico la línea continua representa la curva promedio de las razones espectrales

obtenidas para las diferentes ventanas seleccionadas y las interlineadas su rango de dispersión. Las barras en gris, definen las frecuencias que sobresalen.....82

**Figura 33.** Extremo izquierdo: curva promedio de las razones espectrales de registros de vibración ambiental, obtenidas para el punto IC-103. Extremo derecho: Gráfico frecuencia – acimut, cuya dirección en el eje vertical,  $0^\circ$  y  $180^\circ$  corresponde a la dirección NS y  $90^\circ$  corresponde a la dirección EO.....83

**Figura 34.** Ejemplo de gráficos frecuencia – acimut, obtenidos para puntos ubicados en el centro del área urbana de Ica, y hacia sus extremos Este y Oeste. Para la ubicación de estos puntos ver la Figura 31.....84

**Figura 35.** Distribución de los periodos dominantes en la ciudad de Ica y su sectorización considerando periodos de 0.6, 0.5 y 0.4 segundos.....87

**Figura 36.** 1Curvas de dispersión, lentitud vs frecuencia (Slowness vs Frequency), obtenidas con la aplicación del método F-K y delimitadas por sus curvas de confiabilidad. Los arreglos circulares realizados en el Campo Ferial de Ica con radios de 10, 30, 100 y 400 metros. En el extremo derecho se muestran las curvas de dispersión obtenidas para los diferentes arreglos sísmicos y el promedio de estas curvas.....89

**Figura 37.** Resultados obtenidos para los 4 escenarios analizados en el ítem 4. De izquierda a derecha, se presenta las curvas de dispersión, perfiles de velocidad ( $V_s$ ) y la correspondencia de la FTT (Función de transferencia teórica – curva negra) obtenida de la inversión del perfil de velocidad con la FTE (Función de transferencia empírica – curva roja) obtenida de los cocientes espectrales para el punto IC-33.....92

**Figura 38.** Izquierda: curvas de dispersión obtenidas con MASW, y MAM. Derecha: perfiles de velocidad ( $V_s$ ) y la ubicación espacial de los puntos donde se realizaron los arreglos.....95

**Figura 39.** Función de transferencia teórica (FTT), calculada mediante la inversión de los perfiles de velocidad ( $V_s$ ) obtenidos con los métodos sísmicos y el método de Haskell (líneas en negro) y la Función de transferencia empírica (FTE), obtenida con H/V para puntos ubicados próximos a las líneas sísmicas (líneas en azul).....96

**Figura 40.** Arriba: Mapa de Anomalías residuales de Bouguer. Abajo: Espectro de

*potencia radial. El cociente de las pendientes de las rectas entre  $4\pi$ , es proporcional a la profundidad de la interfase.....98*

**Figura 41.** *En el extremo superior, se muestra el perfil de elevación,, residual y Bouguer, obtenidos para el Perfil A-A'. En el extremo inferior se presenta, la geoforma de la interfase entre los depósitos sedimentarios y el basamento rocoso ( $\rho=2.5$  y  $2.7 \text{ gr/cm}^3$ ) con capas superficiales ( $\rho=2.5 \text{ gr/cm}^3$ ).....99*

**Figura 42.** *Mapa de zonificación sísmica para la ciudad de Ica.....102*

**Figura 43.** *Mapa de iso-espesores del estrato sedimentario emplazado sobre la cuenca y bajo el área urbana de Ica .....107*

**Figura 44.** *Esquema 3D, de las curvas de isoprofundidades a 60 y 150 metros, de la capa sedimentaria y su geomorfología.....108*

**Figura 45.** *Extremo superior: a) Mapa de isoprofundidades obtenido a partir de los registros de vibración ambiental y su análisis frecuencial b) Esquema 3D de la geoforma de la cuenca de Ica (C.I.) a partir de la distribución de los periodos dominantes. c) Perfil de la geoforma de la cuenca de Ica (C.I.), a partir de los resultados obtenidos con los diferentes métodos sísmicos y geofísicos.....110*

## INDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> <i>Perfiles de suelo (<math>V_{s30}</math>), definidos en la “Norma Técnica E.030, de diseño sismorresistente (2018)”</i> .....	35
<b>Tabla 2.</b> <i>Operacionalización de variables</i> .....	51
<b>Tabla 3.</b> <i>Matriz de consistencia. “Condiciones Geo-Ambientales y su Influencia en el Comportamiento Dinámico de los Suelos de la Ciudad de Ica”</i> .....	52
<b>Tabla 4.</b> <i>Perfiles de suelo (<math>V_s</math>), correspondientes a la tipología del área de estudio. ...</i>	69
<b>Tabla 5.</b> <i>Capas sísmicas obtenidas para la ciudad de Ica. Las líneas LS01 y LS03, fueron obtenidas en los extremos Este y Oeste del valle de Ica; y LS02, sobre el cauce del río Ica.</i>	94

## RESUMEN

*Este estudio provee las características físicas-estratigráficas y dinámicas del suelo donde se emplaza la ciudad de Ica y el dominio de la geoforma de la cuenca en el comportamiento dinámico de sus suelos. Para ello se aplican cinco métodos geofísicos: razones espectrales (H/V), Métodos sísmicos (F-K, MASW, MAM) y el método gravimétrico. Los resultados muestran que los suelos del área urbana de Ica, responden a tres rangos de periodos: superiores a 2.0 segundos, influenciados por la geoforma del basamento de la cuenca de Ica; periodos de 0.5 y 1.2 segundos asociados a depósitos sedimentarios de gran potencia y la zona de transición; y los periodos inferiores a 0.5 segundos, influenciado por estratos sedimentarios superficiales. El análisis gravimétrico y el espectro de potencia, evidencian que la geoforma del basamento de la cuenca de Ica es irregular con cambios bruscos conforme tiende hacia su extremo Este en donde alcanza profundidades que varían entre 60 y 150 metros.*

*La demarcación sísmica de los suelos de dicha ciudad, se construyó con la interpretación en conjuntos de los resultados geofísicos y con las características geo-ambientales locales, definiendo 4 zonas que abarcan a suelos Tipo S1 (0.2 y 0.3 seg.); S2 (0.3 y 0.5 seg.), S3 ( $T > 0.5$  seg.) que corresponden a suelos rígidos a semirrígidos y S4 (excepcionales) a suelos heterogéneos y sueltos, cuyo comportamiento dinámico ante la ocurrencia de sismos es complejo. Estos suelos están presentes a lo largo del río Ica (zona inundable), sectores de la Urb. Santa Rosa próximos a la duna y en la Laguna Huacachina.*

*Las múltiples reflexiones y refracciones en los depósitos sedimentarios asentados sobre la cuenca de Ica, influyen localmente en la respuesta de los suelos de la ciudad de Ica a muy bajas frecuencias y/o periodos que sobrepasan los 2.5 segundos (afectando principalmente a estructuras con más de 20 pisos). Asimismo, los diferentes tipos de suelos, modifican el comportamiento frecuencial del suelo, amplificación del sacudimiento superficial y acondicionan el tipo de estructura a construirse sobre ellos. Esta tesis provee las bases para una correcta zonificación territorial, la cual permite gestionar adecuadamente la distribución de áreas urbanas y así disminuir el riesgo sísmico de la población de Ica.*

## ABSTRACT

*In this study we will know the physical and dynamic characteristics of the soil where the city of Ica is located and the influence of the geoform of the basin on the dynamic behavior of its soils. Five geophysical methods are used for this purpose: (H/V), spectral ratio, seismic methods (F-K, MASW, MAM) and the gravimetric method. The results show that the soils of the urban area of Ica respond to three ranges of periods: superior to 2.0 seconds, influenced by the deep geoform of basement the basin of Ica; periods of 0.5 and 1.2 seconds associated to sedimentary deposits of great power and zones of transition; and the periods inferior to 0.5 seconds influenced by superficial sedimentary strata. The gravimetric analysis and the power spectrum show that the geoform of basement the Ica basin is irregular with abrupt changes as it tends towards its eastern end, where it reaches depths that vary between 60 and 150 meters.*

*The seismic zoning of the soils of the city of Ica, was constructed with the interpretation in sets of the geophysical results and with the local geo-environmental characteristics, defining 4 zones that correspond to soils Type S1 (0.2 and 0.3 sec.); S2 (0.3 and 0.5 sec.) and S3 ( $T > 0.5$  sec.) that correspond to semi-rigid soils and S4 (exceptional) to heterogeneous and loose soils, whose dynamic behavior before the occurrence of earthquakes is complex. These soils are present along the Ica river (floodable zone), sectors of Santa Rosa neighbourhood, near the dune and in Huacachina Lagoon.*

*The multiple reflections and refractions in the sedimentary deposits settled on the basin of Ica, locally influence the response of the soils of the city of Ica to very low frequencies and/or periods that exceed 2.5 seconds (affecting mainly structures with more than 20 floors). Likewise, the different types of soils modify the frequency content, amplification the seismic waves and condition the type of structure to be built on them.*

*This thesis provides the basis for a correct territorial zoning, which allows to properly managing of the distribution of urban areas and thus reducing the seismic risk of the population of Ica city.*

## CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN

En la región central del Perú, la tectónica de placas tiene influencia en la formación de la cuenca hidrográfica de Ica (C.I.), y la modela como una depresión ubicada entre la línea de costa y la cordillera occidental de los Andes. La Cuenca de Ica, por extensión y diferentes niveles de altura, se sectoriza en cuenca alta, media y baja. En la cuenca baja, se emplaza la ciudad de Ica, entre en las coordenadas UTM; 421284E, 8445073N, Zona 18, y con cota promedio de 414 m.s.n.m.

La ciudad de Ica tiene una población de 366,751 habitantes (INEI, 2016), y representa el 46% de la población del departamento de Ica, constituyéndose como la ciudad de mayor predominio urbano. Producto de las migraciones en los últimos años por factores socio-económicos de la región, la población se ha incrementado exponencialmente a través de las urbanizaciones y/o asentamientos humanos en la ciudad, originando un desarrollo caótico y desordenado, incrementando su vulnerabilidad a la ocurrencia de peligros naturales.

Los principales peligros que afectan a esta ciudad son los terremotos, inundaciones, flujos de escombros, caídas de rocas y depósitos de arena eólica; todas con diversos periodos de recurrencia; donde los daños y efectos se han incrementado debido al crecimiento de la ciudad.

Los terremotos de 1942 (7,8 Mw), 1996 (7,6 Mw) y 2007 (8,0 Mw) dañaron severamente las ciudades de Pisco, Ica y Nazca. El terremoto del 2007, conocido como el terremoto de Pisco generó “intensidades máximas de VII-VIII en escala Mercalli Modificada (MM)” dentro de un radio de 250 kilómetros, incluyendo las ciudades de Pisco, Ica y Chincha. Este terremoto es considerado como el más grande de los últimos 300 años (Tavera y Bernal, 2008), ya que presentó características particulares como su duración (120 segundos) y un proceso complejo de ruptura que indujo la generación de un tsunami local. El daño estructural más significativo se observó en casas de adobe y quincha (INDECI, 2007). En total, los daños se concentraron en más de 12 localidades de Ica, Lima y Huancavelica debidos en



muchos casos a efectos locales (licuefacción del suelo a lo largo de la costa y suelos débilmente consolidados), deslizamientos de tierra en caminos, a la antigüedad y al deterioro de las edificaciones (Tavera et al., 2008).

El comportamiento dinámico de los suelos ante una solicitancia sísmica, depende de las condiciones geo-ambientales del lugar donde se emplazan las viviendas (Bonneyoy-Claudet, et al., 2009). En el departamento de Ica predomina un ambiente tectónico geomorfológico, geológico y fisiográfico complejo y que en conjunto forma la cuenca del río Ica. Considerando este escenario, es necesario determinar el potencial del estrato sedimentario superficial y la geometría de la cuenca sedimentaria, a fin de comprender mejor la relación entre la respuesta del suelo y la distribución de los daños estructurales debidos a la ocurrencia de un terremoto.

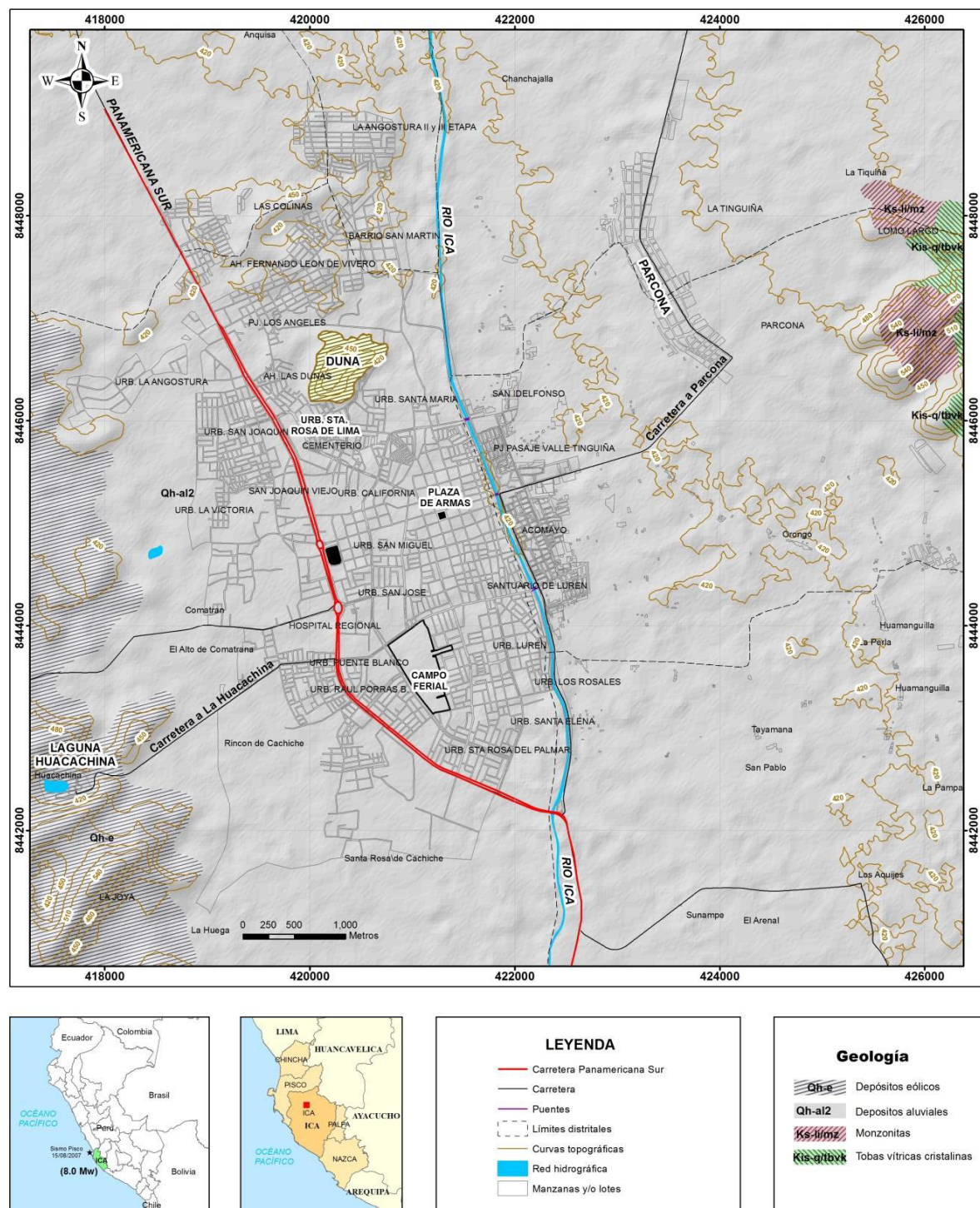
Conocer las características físicas-estratigráficas de los suelos, es de interés científico para comprender la respuesta dinámica de los suelos y así, reducir su riesgo ante el alto potencial sísmico que caracteriza a esta región. En este estudio, se evaluó la influencia de la geomorfología de la cuenca hidrográfica de Ica en la respuesta dinámica de sus suelos. Para conocer las tipologías físicas y dinámicas de los suelos, se aplicó cinco métodos geofísicos: Relación espectral (H/V), frecuencia-número de ondas (F-K), análisis de múltiples canales de ondas de superficie (MASW), análisis multicanal de microtemblores (MAM) y el método gravimétrico. La integración de los resultados obtenidos con cada método, permitirá conocer las características geofísicas de los suelos, así poder zonificar los diferentes tipos de suelo y generar un modelo en dos dimensiones (2D) de la cuenca sedimentaria de Ica. Estos resultados contribuirán con la mejor gestión del territorio y su posterior reducción del peligro.

## **1.1. UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO**

En el borde occidental del territorio peruano, se ubica la ciudad de Ica, capital de la provincia y departamento del mismo nombre. La Provincia de Ica, esta delimitada por las provincias de Pisco, Palma, Nazca, Huaytará (Departamento de Huancavelica) y por litoral del Océano Pacífico.

La ciudad de Ica se emplaza dentro del valle del río Ica, presentando una topografía casi plana que varía entre 400 y 420 m.s.n.m.; rodeada por las localidades de San Juan Bautista, Parcona, Aquijes, Pueblo Nuevo y hacia el Oeste por dunas.

En la Figura 1, se presenta el plano catastral de la urbe de Ica, y en ella se resalta la ubicación de la Plaza de Armas, Campo Ferial, hacia el SO la ubicación de La Laguna Huacachina y al NE la localidad de Parcona. Asimismo, se hace referencia a la Urb. Santa Rosa, que por su proximidad y expansión hacia las dunas presenta suelos sueltos. El río Ica, atraviesa la ciudad de Norte a Sur, ubicándose en la zona céntrica de la ciudad, en su margen derecha y la carretera Panamericana Sur en su borde Oeste. El río Ica y la Panamericana, convergen al lado sur de la urbe.



**Figura 1.** Mapa catastral y geológico de la ciudad de Ica.

## 1.2 SITUACIÓN PROBLEMÁTICA

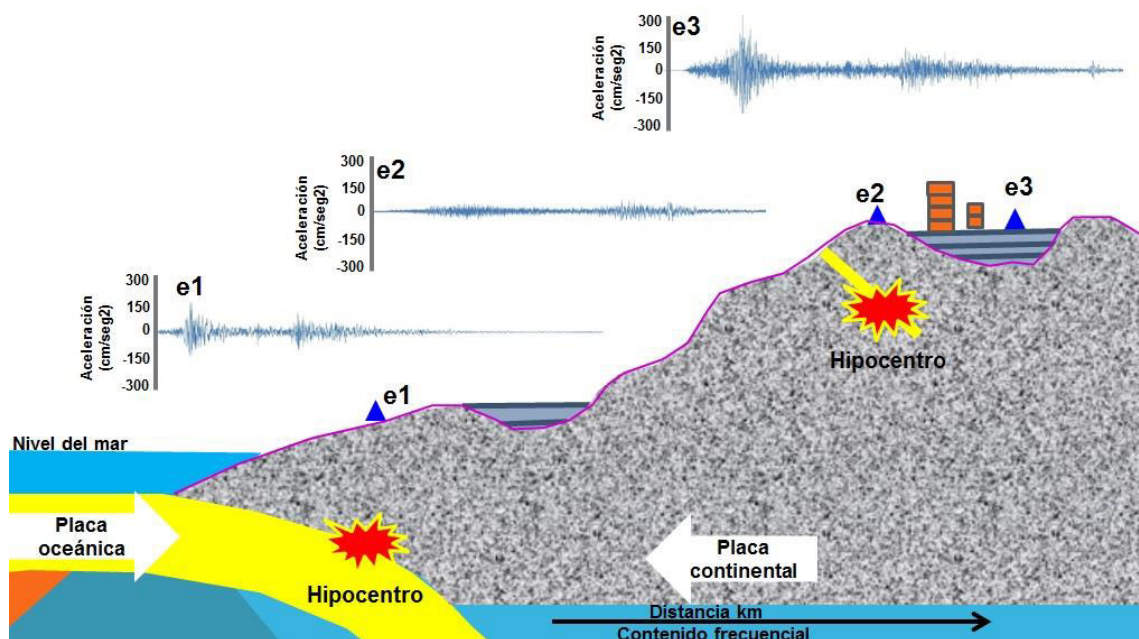
Históricamente, los mayores daños ocurridos por peligros naturales en Ica han sido de origen sismo-tectónico y climático. En ambos casos, “la geomorfología y los tipos de suelos”, entre otros factores, han determinado la situación problemática de la ciudad.

Los peligros naturales que han provocado situaciones de desastre en esta región son las inundaciones, huaycos, deslizamientos y procesos eólicos (Bendezú y Mallqui, 1999). Asimismo, los factores antropológicos, como la expansión urbana sin planificación y desconocimiento de las características dinámicas de los suelos, han incrementado la situación problemática de la ciudad de Ica.

***Por el alto potencial sísmico de la región Central del Perú***, la ciudad de Ica ha sido devastada por varios terremotos como ocurrió en 1942 (8.0 Mw), 1996 (7.6 Mw), 2007 (8.0 Mw), todos provocaron pérdidas humanas y cuantiosos daños materiales. Del mismo modo, los daños estructurales más importantes, se observaron en casas edificadas con “adobe y quincha”. Estos daños se relacionaron principalmente con efectos de sitio locales debido a la calidad de los suelos (licuefacción, asentamientos, etc.), la edad de las construcciones y los deslizamientos en las carreteras. Para estar preparados adecuadamente ante estos peligros, se requiere tener conocimiento preciso de los peligros a los que se expone la población, a fin de realizar una adecuada planificación urbana y su concordancia con el medio que lo rodea, sabiendo que los procesos sísmicos son recurrentes.

***Los efectos de sitio***, es una característica de los suelos blandos, que ante el paso de las ondas sísmicas genera un incremento en sus niveles de sacudimiento afectando directamente a las estructuras ahí construidas (Figura 2). Esto conlleva a una dependencia de las características “estratigráficas, geológicas, geomorfológicas, geodinámicas, geotécnicas, sísmicas y geofísicas de los suelos”. Adicionalmente, otro factor potencial de daños, es asociado al tipo de edificaciones que se construyen sobre estos suelos, cuyo comportamiento dinámico depende de su relación con el suelo, geometría, configuraciones y materiales utilizados en su construcción. Así como de su uso, antigüedad y deterioro que podrían incrementar su inestabilidad. En el peor

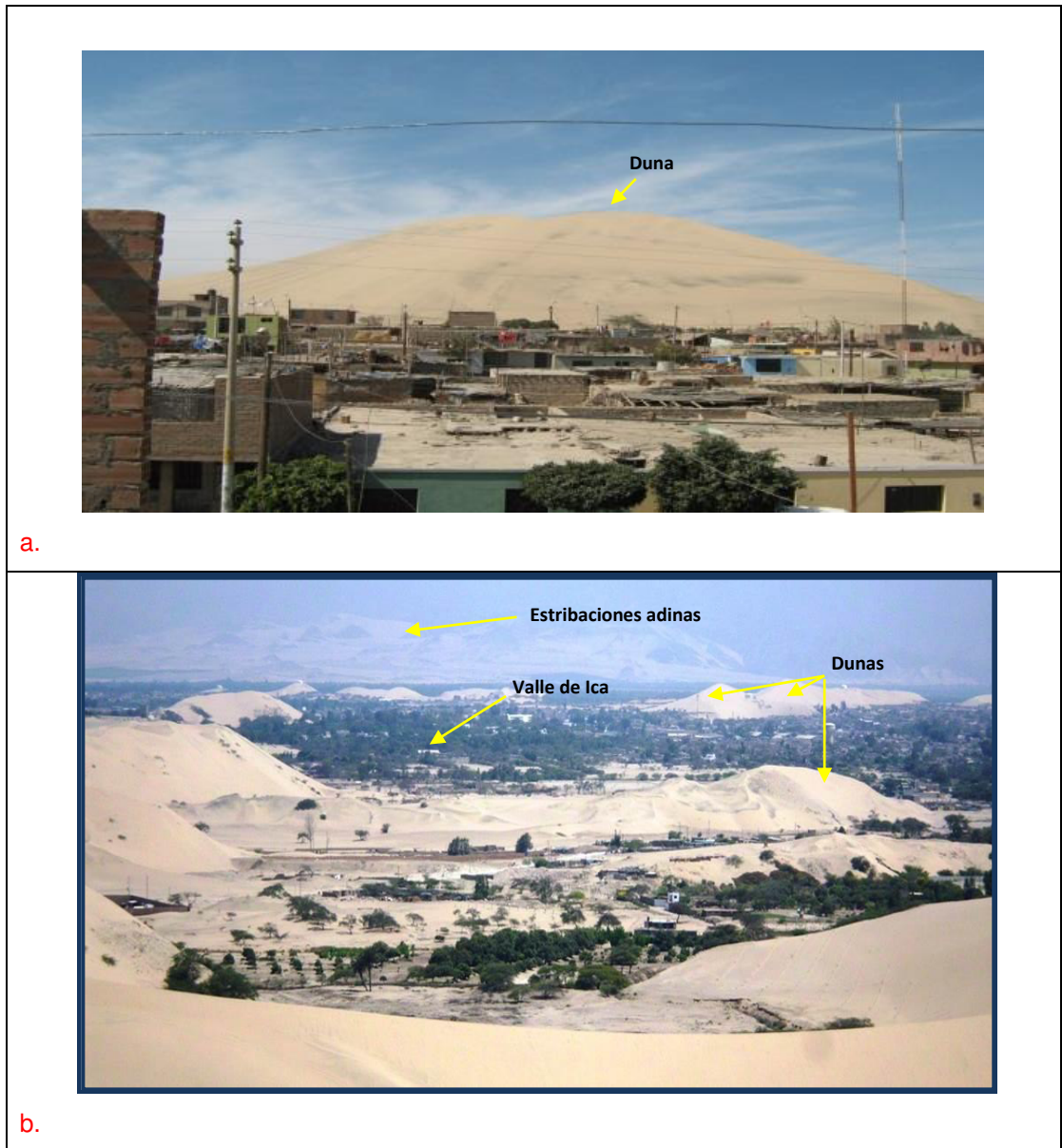
escenario, al coincidir la frecuencia fundamental de respuesta del suelo con el de la edificación, se dice que la estructura pasa a un estado de resonancia, teniendo altas probabilidades de experimentar el colapso o daños mayores en su estructura.



**Figura 2.** Efectos del suelo, que amplifican el sacudimiento en superficie, puesto en evidencia con la amplitud del registro sísmico obtenido sobre roca y sedimentos. Dependiendo de las características de las estructuras, y su relación con el suelo, estas pueden o no ser dañadas estructuralmente. Fuente: IGP, 2015.

La ciudad de Ica, está delimitada por las estribaciones andinas hacia su extremo Este y por depósitos eólicos hacia su extremo Oeste (mantos de arena y dunas) (Figura 3). El gran espesor de estos depósitos eólicos, son una particularidad de esta ciudad, que al estar sometida a una acción eólica continua permite que se acumule grandes volúmenes de arena que forman potentes capas de arena a nivel superficial, dándole a este sector un aspecto árido y semiárido. Según la Figura 4, hay sectores donde los depósitos eólicos cubren parcialmente las viviendas, sobretodo en la Urbanización Santa Rosa, parte norte (ver Figura 1). Es importante remarcar, que el espesor y rigidez de estos depósitos y la geomorfología de la interfase suelo-roca, influye en el comportamiento dinámico del suelo ante la eventualidad de un movimiento sísmico.





**Figura 3.** a) Imagen que evidencia la proximidad de dunas (depósitos de arena) al área urbana de Ica. b) Imagen panorámica del valle de Ica, donde se resalta las estribaciones andinas y las dunas. Fuente: Gómez et al. (2013).



**Figura 4.** Depósitos eólicos cubriendo parcialmente algunas viviendas ubicadas a 1.5km al Noroeste de Ica, Urb. Santa Rosa.

Otro de los elementos que incrementa la vulnerabilidad de la ciudad ante un evento sísmico, son los depósitos antrópicos y/o residuos sólidos, dejados en diversos sectores de la ciudad que posteriormente son urbanizados (Figura 5).



**Figura 5.** En el AA.HH La Victoria se ubica una laguna natural de 4.5m de profundidad, la cual viene siendo rellena por material antrópico con la finalidad de ser ocupada. Fuente: Gómez et al. (2013).

Asimismo, sectores de la ciudad debido al predominio de suelos arenosos han experimentado “asentamientos diferenciales en las edificaciones a consecuencia de las deformaciones de estos suelos” y en otros fenómenos de licuación de suelos debido a la disminución de la resistencia a la fuerza cortante durante la ocurrencia de terremotos del 12 de mayo de 1996 (7.6 Mw) y 15 de agosto de 2007 (8.0 Mw).

Uno de los principales eventos geodinámicos que afectan a la ciudad de Ica, son las inundaciones por el desborde del río Ica. Su cuenca tiene una configuración abrupta con pendientes pronunciadas en el sector alto y medio, y que conforme tiende hacia la parte baja las pendientes son poco pronunciadas, provocando que el recorrido del río sea angosto y es insuficiente para evacuar en forma inmediata las abundancias de agua. Como medida de protección se ha encauzado el mismo mediante la construcción de terraplenes en la margen derecha del mismo, aunque estas se encuentran afectadas por relleno de residuos sólidos (Figura 6).



**Figura 6.** Terraplenes en ambas márgenes del río Ica. La acumulación de material de origen antrópico afecta dichas estructuras.

Según INDECI, se han identificado zonas susceptibles a inundaciones, algunas de ellas con antecedentes catastróficos debido a la ocurrencia del fenómeno El Niño de 1998 (Figura 7). En este caso, el 80% de la población fue afectada (SIREDECI, 2002; PNUD, 2007).





**Figura 7.** El desborde del Río Ica durante El Niño ocurrido en el año 1998, causo la inundación de las principales céntricas calles de la ciudad de Ica, llegando hasta la plaza central que queda a 500 metros del cauce del río. Fuente: Imágenes tomadas de Rosell (2002).

### **1.3. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA**

#### **1.3.1. Problema general**

¿Cuál es la relación entre las condiciones geo-ambientales locales y el comportamiento dinámico de los suelos de la ciudad de Ica, a bajas frecuencias ante la ocurrencia de sismos?

#### **1.3.2. Problemas específicos**

-¿Qué relación existe entre la distribución de las frecuencias predominantes del suelo con el espesor del depósito sedimentario?

-¿En qué medida el factor de amplificación máxima relativa se relaciona con los diferentes tipos de suelo?

-¿En qué medida la profundidad de la interfase suelo-roca influye en la respuesta dinámica de los suelos de la ciudad de Ica?

### **1.4 JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN**

Con esta investigación se determinará la influencia de la geomorfología de la cuenca del río Ica en la respuesta dinámica de la superficie de la ciudad ante la ocurrencia de sismos. Trabajos similares realizados por Toten et al. (2004), a partir de simulaciones teóricas, concluyeron que el campo de ondas a frecuencias de 0.25 a 0.5 Hz es dominado por el efecto asociado a la geomorfología de cuencas (resonancias 2D). Del mismo modo, Fah et al. (2002) concluyeron que la geometría de los valles evidencian que su respuesta dinámica depende del nivel al que se encuentra la interfase sedimento-roca. A niveles superficiales “el campo de ondas es dominado por la propagación lateral de las ondas superficiales generadas en el eje del valle” pudiendo causar resonancia local y a niveles profundos, la interferencia de estas ondas con la

propagación vertical, pueden generar un patrón de resonancia 2D, en ambos casos a bajas frecuencias.

#### - JUSTIFICACIÓN PRÁCTICA

Esta investigación permitirá demostrar que las vibraciones ambientales al igual que las ondas sísmicas al propagarse por el medio, son moduladas por las características físico-dinámicas del subsuelo definidas por las condiciones geo-ambientales y geoforma del basamento de la cuenca del río Ica.

#### - RELEVANCIA SOCIAL

Desde el punto de vista social, es necesario comprender como los suelos responden dinámicamente ante los sismos, con la finalidad de tipificarlos y realizar su zonificación Sísmica, información que brindará a las autoridades y pobladores una herramienta básica para la planificación y ordenamiento territorial. La información a generarse también facilitará el diseño de estructuras sísmo-resistentes y la implementación de estrategias de intervención integral orientadas a la solución de problemáticas sociales y ambientales en la ciudad.

Por otro lado, este estudio contiene información básica para que las autoridades puedan estimar el probable nivel de daño de edificaciones existentes ante la eventualidad de un suceso sísmico y la posibilidad de determinar el riesgo en inversiones de infraestructura y el desarrollo de la actividad socio-económica.

### **1.5. ANTECEDENTES DEL ESTUDIO**

En el ámbito nacional, para la ciudad de Ica se han realizado diversos estudios geotécnicos, hidrológicos y geológicos; pero no de tipo geofísico, aun sabiendo que estos permiten conocer los parámetros dinámicos de los suelos con mayor precisión. En general, estos estudios sirven como insumo para otros de mayor alcance como el que se desarrolla en esta investigación. A continuación, se menciona los de mayor

relación:

-En el informe técnico Prevención, Mitigación y manejo del Fenómeno de El Niño (CEREN-PENUD, PER 97/031). Se indica que “el Fenómeno del Niño debe ser tratado con doble finalidad, de un lado con fines de rehabilitación y reconstrucción, y de otro, para promover procesos de desarrollo sostenible a nivel local”.

-Estudio Geodinámico de la Cuenca del río Ica elaborado por Olivares et. al. (1994). Se caracteriza la hidrología de la cuenca y su influencia en los riesgos geológicos a escala regional. Asimismo, para la cuenca del río Ica elaboraron el mapa litológico-estructural y otro geomorfológico-geodinámico a escala 1:100 000.

-Tesis sobre la “microzonificación de la ciudad de Ica frente a sismos e Inundaciones de Mitma (2001)”. Se basó principalmente en aspectos geotécnicos que permiten identificar la existencia de 5 microzonas, cuyos suelos presentan diferentes características geotécnicas. De estas zonas, la zona V, ubicada próximo al río Ica, es “la más crítica a pesar de que geotécnicamente tiene un suelo favorable (capacidad portante varía de 1 a 1.5 Kg/cm<sup>2</sup>)”. La misma que es susceptible a experimentar procesos de licuación de suelos y pueden ser altamente inundable.

-Diagnóstico y evaluación de la vulnerabilidad en la ciudad de Ica por Medina (2002). Se evaluaron los perjuicios generados por el evento El Niño del año 1998. Asimismo, en base a la vulnerabilidad física se realizó la zonificación de los peligros y amenazas que afectan la ciudad de Ica.

-En base a resultados geotécnicos, que forma parte del “estudio de microzonificación de la ciudad de Ica frente a sismos e inundaciones” por parte de Grover et al., (2005), se identificaron 5 tipos de suelos, tal como lo indico Mitma (2001)

-En el estudio técnico que define un “Plan de uso del suelo ante desastres y medidas de mitigación de las Ciudades de Ica, Parcona, La Tinguiña, Subtanjalla y San José de los Molinos” elaborado por INDECI (2007); se estimaron 4 rangos de peligros en la ciudad de Ica.

*a) La zona de peligro Muy Alto:* Es producto de los peligros de flujos aluvionales debido a la ocurrencia de lluvias intensas generadas por fenómenos de lluvia intensa. Estas causan destrucción, colmatación de cuencas y crecida de los niveles del agua, que puedan generar un desborde en forma directa o indirecta en zonas cercanas y/o topográficamente planas como ocurrió en 1998.

*b) Zona de Peligro Alto:* Considera “la franja aledaña a todas las zonas de peligro”. Muy alto y zonas de fácil inundación. Se adicionan los bolsones inundables indirectamente como producto de las tuberías de desagüe, canales o capas permeables. Las zonas desérticas del Oeste, está en este grupo.

*c) Zonas de peligro Medio:* Considera a los campos agrícolas que se encuentran entre la zona del río Ica y el canal de La Achirana.

*d) Zonas de peligro Bajo:* Está focalizada en la zona del extremo oeste de la Av. Los Maestros. Ahí se encuentran el “Hospital Regional, la Facultad de Medicina de la Universidad de Ica (UNICA), el estadio, las urbanizaciones Sérvulo Gutiérrez, San Carlos, Señor de Luren, Puente Blanco y otras” (INDECI, 2007, p. 45).

## **1.6. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN**

### **1.6.1.-Objetivo General**

Determinar la relación entre las condiciones geo-ambientales y el comportamiento dinámico de los suelos de la ciudad de Ica a bajas frecuencias, ante la ocurrencia de sismos.

### **1.6.2.-Objetivos específicos**

Establecer la relación entre la distribución de las frecuencias predominantes del suelo con el espesor del depósito sedimentario.

- Determinar la influencia del factor de amplificación máxima relativa con los diferentes tipos de suelo.
- Determinar la influencia de la profundidad de la interfase suelo-roca con la respuesta dinámica de los suelos de la ciudad de Ica.

## **CAPITULO 2: MARCO TEÓRICO**

### **2.1. MARCO FILOSÓFICO**

Al concebir el asentamiento y expansión urbanística de una ciudad, automáticamente se entiende que la misma estará conectada al suelo mediante la relación “suelo-estructura”, siendo esta interacción la que garantizará la estabilidad de la estructura, siempre y cuando se edifique adecuadamente para una determinado tipo de suelo.

En el diseño de viviendas o edificaciones se debe de entender el término “sismorresistente”, y entender las potenciales amenazas de tipo sísmico, geotécnico, geológico y/o hidrológico que las pueden afectar; por eso es importante diseñarlas cumpliendo los parámetros respectivos, que le permitirá interactuar con su medio.

Se debe determinar y delimitar las zonas cuyos suelos presentan particularidades como un alto potencial de licuación (“pérdida súbita de resistencia al cortante de suelos saturados debido al incremento de presiones de poros ocasionado por vibraciones del terreno por acción sísmica”), suelos expansivos o zonas de relleno sólido, cuya respuesta dinámica ante la ocurrencia de un sismo es compleja.

En este escenario, es necesario contar con estudios que contribuya a la gestión del riesgo, en ciudades ubicadas en zonas con alto potencial sísmico, considerado como información básica los mapas de zonificación de suelos en base a su respuesta dinámica. Esta permitirá, para cada tipo de suelo, diseñar y construir la estructura adecuada a fin de disminuir su riesgo y en conjunto construir ciudades más seguras y en armonía con la naturaleza

### **2.2. MARCO GEOAMBIENTAL**

#### **2.2.1. Ambiente geológico**

Geológicamente, la ciudad de Ica se encuentra sobre depósitos sedimentarios

emplazados sobre un basamento constituido por rocas volcánicas. Asimismo, se ha identificado, la presencia de afloramientos de rocas volcánicas en el extremo “Suroeste de la ciudad conformando las prolongaciones del cerro Portachuelo” (PNUD, 2007).

Los depósitos sedimentarios, corresponden a materiales aluviales, eólicos, fluviales y antropogénicos y presentan las siguientes características:

- Depósitos aluviales: Se distribuyen de NE-SO; limitando hacia el Oeste y el Este con depósitos eólicos que se extienden hasta las fronteras de los depósitos coluviales. Consisten en gravas gruesas con arenas, limos y arcillas. El fluir de las aguas superficiales ha permitido la formación de relieves suaves y bajos formando una llanura inundable.
- Depósitos eólicos: Se han constituido por el transporte eólico de arena media y limo, con poca solidez. Se extienden del Oeste a Este, hasta la zona de inundación del río Ica y hacia el Norte, sobre el cerro Saraja.
- Depósitos fluviales: Se distribuyen en el cauce del río, se componen de materiales de origen ígneo cuyas formas y tamaños son diferentes.
- Depósitos antropogénico: Están situados en la parte sur de la ciudad y consisten en los desmontes de las construcciones y residuos sólidos. Estos presentan baja consistencia.

### **2.2.2. Ambiente geomorfológico**

El ambiente geomorfológico de la ciudad de Ica, es consecuencia de un continuo proceso de esfuerzos compresionales que deformaron a las unidades sedimentarias ubicadas en este sector, adquiriendo diferentes formas, que constantemente son modificadas por la acción fluvial, eólica, gravedad y acción antrópica.

- La cuenca del río Ica: La ciudad es parte de este valle que se ha formado entre los cerros y quebradas por donde discurre agua de las zonas altas conocidas como cuenca alta, para luego descender rápidamente en la



cuenca media y finalmente llegar a la cuenca baja donde la pendiente es menor, permitiendo el mayor depósito de material sedimentario arrastrados por el agua en su recorrido.

- Terraza aluvial: La ciudad de Ica, se emplaza sobre una terraza aluvial que consiste en una antigua llanura de inundación del río Ica, con alturas promedio de 2 metros del actual cauce del río Ica.
- Dunas: Estas geoformas se modelan por el amontonamiento de arena, generada por el viento, con formas asimétricas; que pueden presentar estructuras de media luna como el cerro Saraja (extremo norte del área urbana de Ica).
- Laguna Huacachina: Está ubicado en el parte Sur Oeste de la ciudad de Ica, sobre una depresión topográfica a 5 km. La laguna, se ubica en medio de dunas, cuyas alturas sobrepasan los 100m sobre el nivel local del agua. Sobre su origen existen diversas teorías, pero la más aceptable es que fue formada “a raíz de un hundimiento subterráneo local debido a la disolución del material salino de las deformaciones infrayacentes de origen marino” (Gonzales, 2014). Originado por el desplazamiento de las placas tectónicas y el sacudimiento del suelo generado por los sismos.

### **2.2.3. Ambiente geodinámico**

El contexto tectónico de la ciudad de Ica es consecuencia de un proceso geodinámico donde predomina un régimen de esfuerzos compresionales, los cuales formaron la cuenca y el valle de Ica. Entre los más importantes se mencionará al proceso de subducción de la placa de Nazca bajo la Sudamericana, la Dorsal de Nazca, proximidad a la fosa Perú-Chile, la Cordillera de los Andes, escenario que traen consigo una importante actividad sísmica en el borde occidental de la zona costera y la relacionada con la activación de fallas extensionales evidenciadas por el sistema fisiográfico de la cuenca del río Ica. Estos procesos han ocasionado la actual topografía y el dominio de un ambiente desértico con la presencia de extensos mantos de arena y un gran número de dunas.

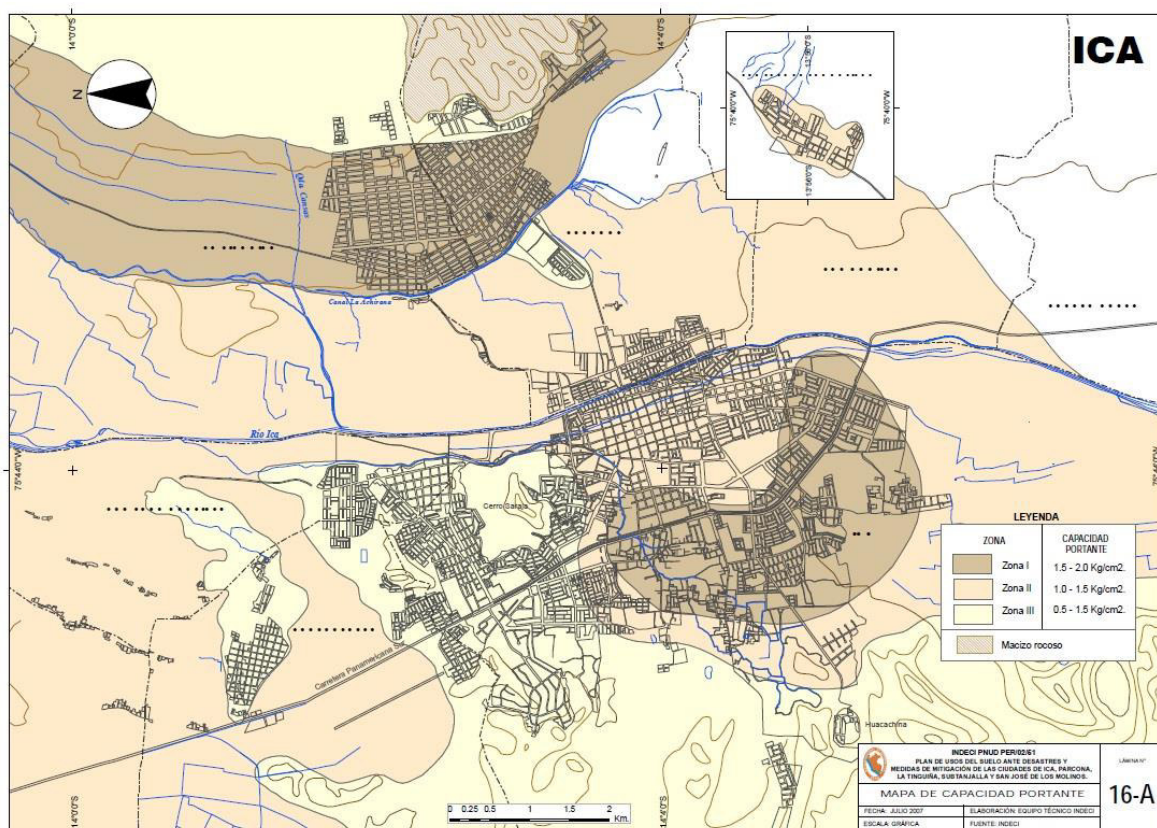
A continuación se describe los principales elementos tectónicos que generan un ambiente geodinámico activo en Ica:

- Proceso de subducción*: Se desarrolló por el deslizamiento del borde de la placa de Nazca (oceánica) por debajo de la placa Sudamericana (continental). Aquí se distinguen un cambio en la tendencia de subducción, de subhorizontal a normal conforme tiende hacia la región sur (Cahill y Isacks, 1992; Spence et al., 1998; Bernal, 2002). En la actualidad, estudios de GPS han permitido conocer que el proceso de subducción se realiza con velocidades del orden de 7 a 8 cm/año (DeMets et al, 1994; Norabuena et al. 1999; Villegas et. al. 2016).
- La Fosa Perú-Chile*: Demarca el inicio de la interacción de las placas de Nazca bajo la placa Sudamericana. Alcanza profundidades de entre 5000 a 6000 m., siendo menor en la costa central del Perú. Asimismo, en este sector muestra una contorsión de Norte Este a Sur Oeste, encontrándose más próximo a la región Ica con relación al resto de regiones.
- La Dorsal de Nazca*: es una cordillera sumergida en el lecho marino y ubicada a la altura de la latitud de 15°, en la costa central del Perú, cuyo eje principal se orienta de Noreste-Suroeste, incidiendo con la margen de la región Nazca-Ica (Marocco, 1980; Sebrier et al, 1985). La estructura de la dorsal es asimétrica y esta básicamente constituida por rocas volcánicas de hace 5 a 10 Ma aproximadamente, las cotas menores de esta estructura ya subducieron bajo la placa continental, tal como sugieren Howell (1962) y Tavera y Bufo (1998).
- La Cordillera Andina*: es la cadena de montañas que ocupa la zona occidental de América del Sur. La cordillera, en el Perú está adecuadamente delimitada y conformada por diversas unidades morfoestructurales (Cordillera Costanera, Llanura Costera, Cordillera Occidental, Meseta Andina, Cordillera Oriental y Zona Subandina) con extensiones de entre 250 km en la región Norte y Centro de Perú y de 500 km en la región Sur (Marocco, 1980; Tavera y Bufo, 1998). La morfología actual de la cordillera Andina, presenta elevados picos, extensos altiplanos, profundas cuencas y valles longitudinales paralelos a los grandes ejes montañosos.

La ciudad de Ica se ubica entre la Cordillera costanera y llanura costanera.

## 2.2.4. Ambiente geotécnico

A partir de los ensayos de penetración estándar, calicatas y ensayos de laboratorio determinaron la granulometría, consolidación y los límites de Atterberg; Mitra (2001), para la zona de Ica, información que permitió proponer la existencia de tres zonas geotécnicas, tal como se muestra en la Figura 8. Estas zonas tienen las siguientes características: Zona I: suelos limoso de alta compresibilidad (SM) con capacidad de carga admisible de 1.5 a 2.0 kg/cm<sup>2</sup>; zona II: Suelos areno-limosos (SM) con capacidad de carga admisible de 1.0 a 1.5 km/cm<sup>2</sup>; Zona III: Arenas pobremente gradadas (SP) con capacidad de carga admisible de entre 0.5 y 1.0 kg/cm<sup>2</sup>.



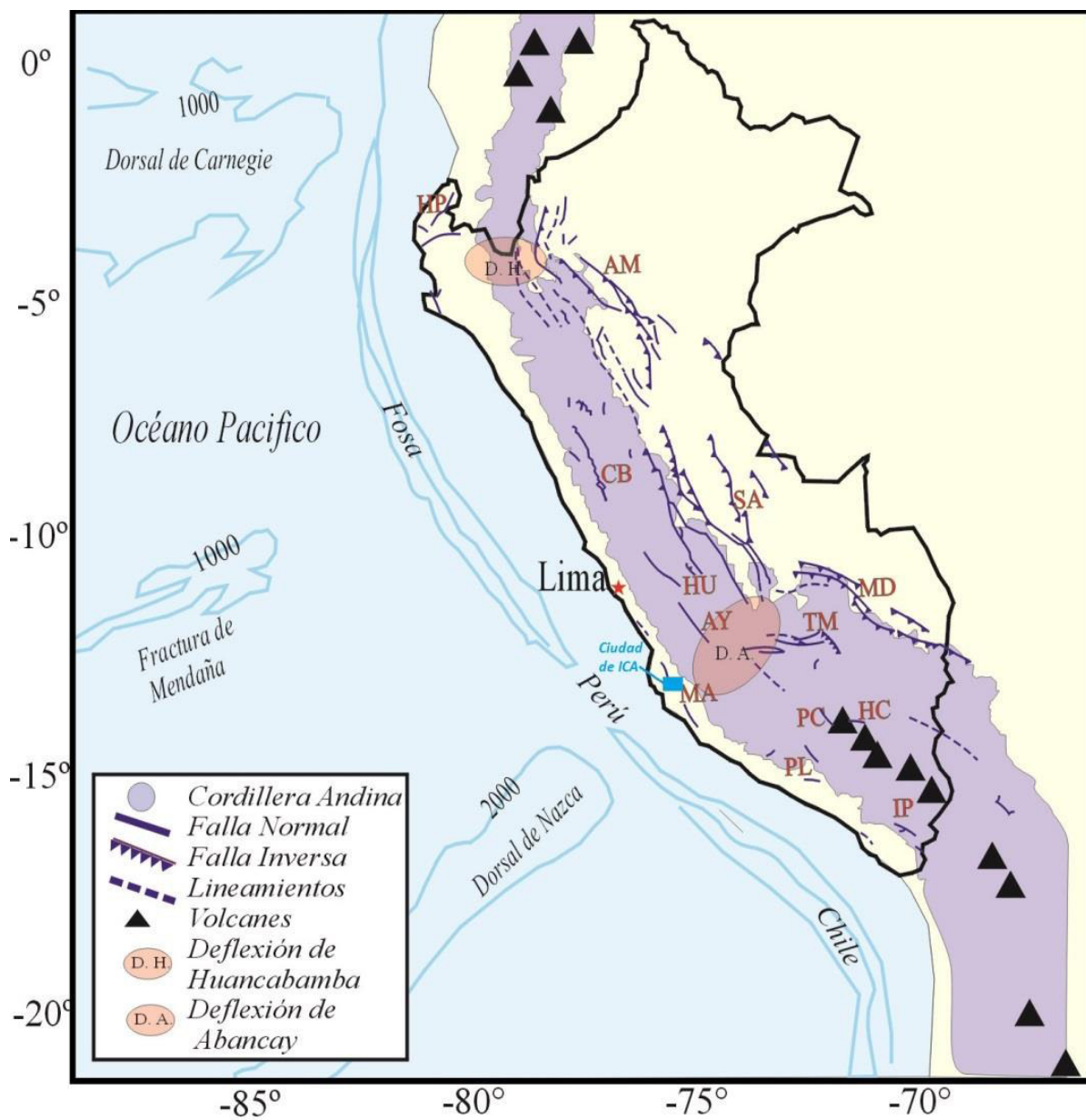
**Figura 8.** Sectorización a partir de la capacidad portante del suelo de Ica. Fuente: INDECI.

## **2.3. MARCO TECTÓNICO**

### **2.3.1. Tectónica regional y local**

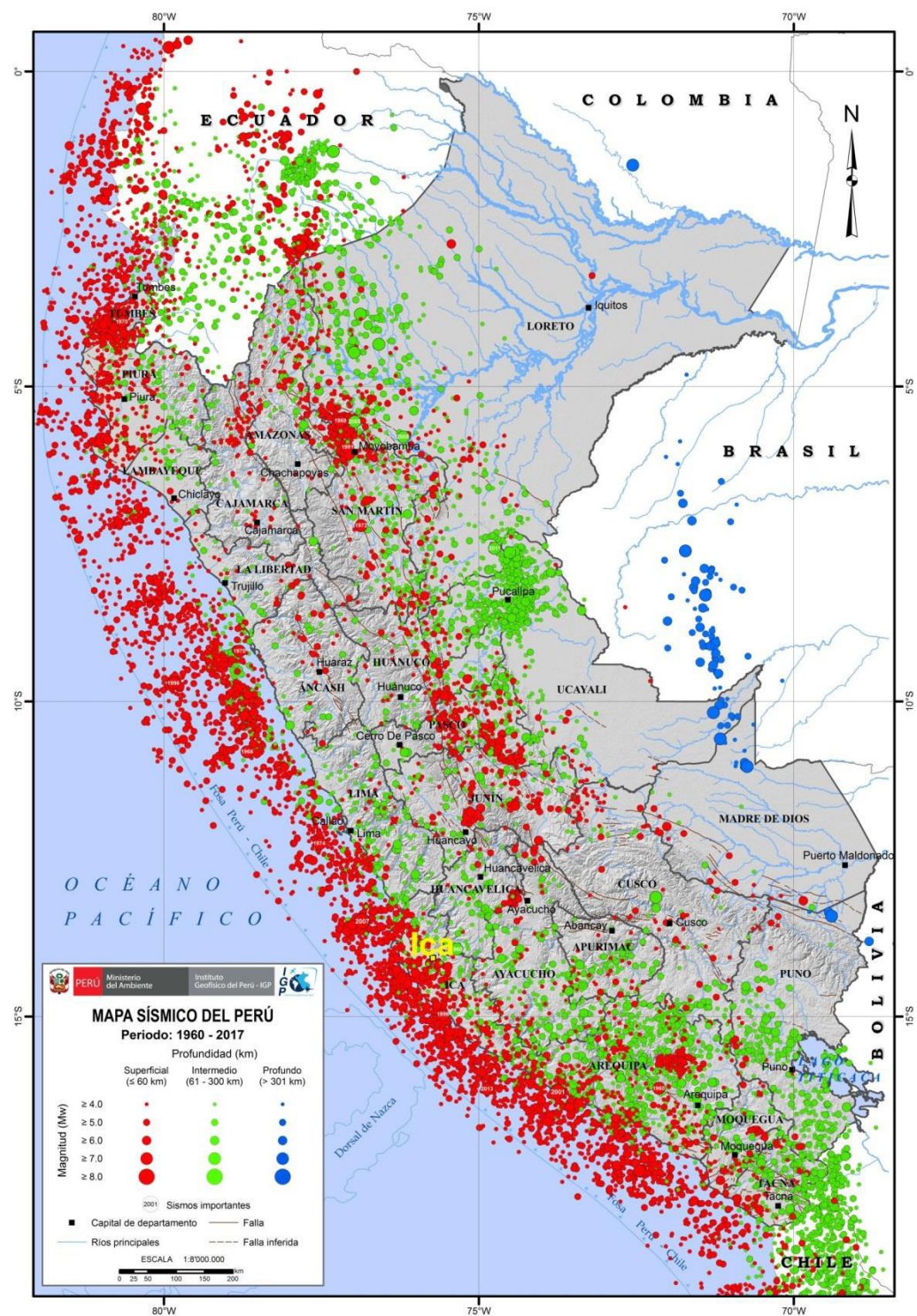
La convergencia de la placa de Nazca bajo la Sudamericana, ha generado el escenario tectónico que domina la geodinámica de Perú - región de Ica (Figura 9). Este proceso es conocido como subducción y su efecto en superficie se refleja en “el arrugamiento y levantamiento del margen continental durante un periodo orogénico muy complejo hasta formar una superficie topográfica muy accidentada” que define actualmente a la Cordillera de los Andes (C.A.). La misma que está constituida por montañas, volcanes, cuencas, mesetas, valles entre otras, que están ubicados entre “la línea de fosa peruano-chilena y el llano Amazónico”.

Este proceso de subducción ha permitido la formación de diversos elementos tectónicos ubicados a ambos extremos de su margen continental y/u oceánico. Los más importantes son (Figura 9): “la Dorsal de Nazca, la Fractura de Mendaña, la Fosa peruana-chilena, la Cordillera Andina, la Cadena Volcánica y los diferentes Sistemas de Fallas distribuidas en el interior del continente”. La primera, es una cordillera sumergida en el lecho marino que al converger con la corteza continental genera frecuentes movimientos sísmicos de moderada y gran magnitud en esta región (Figura 10).



**Figura 9.** Mapa con los elementos tectónicos ubicados a ambos extremos de su margen continental y/o oceánico. Fuente: Imagen tomada de Bernal y Tavera (2002)





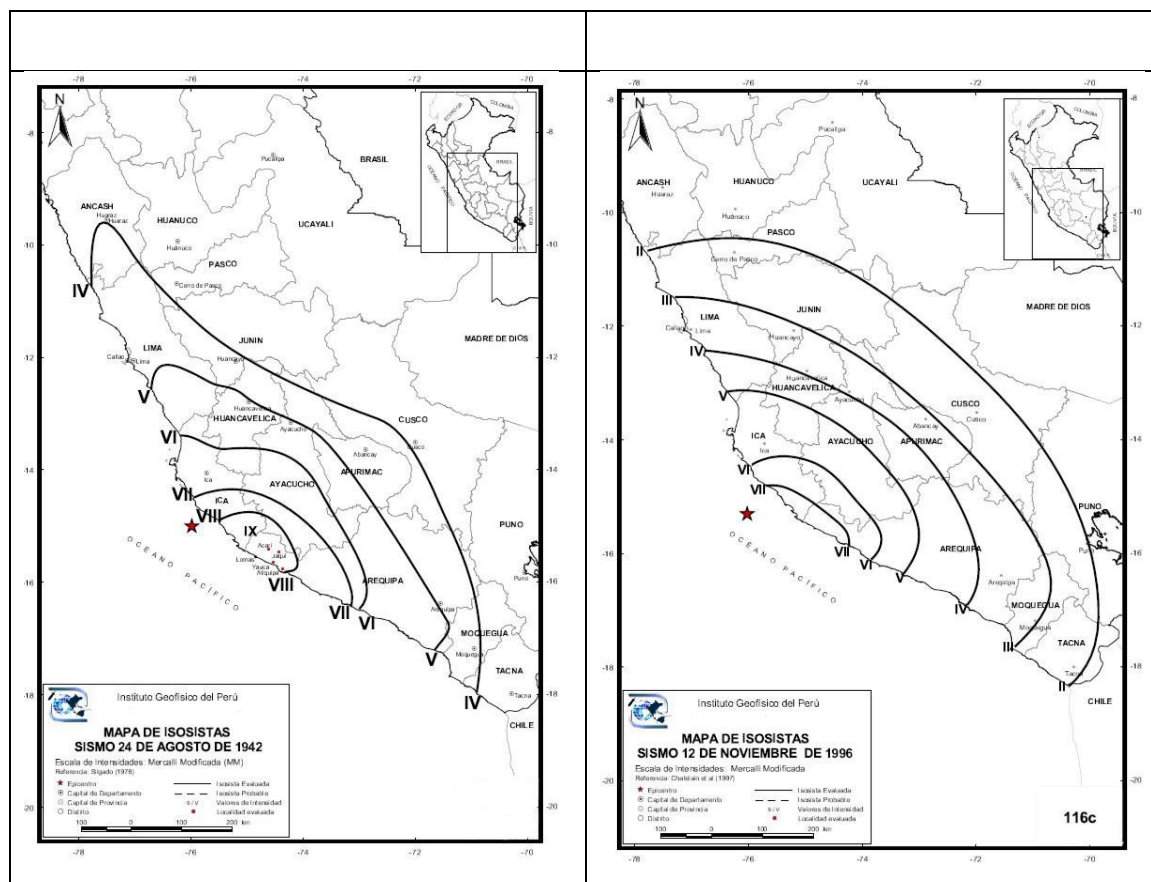
**Figura 10.** Distribución de la actividad sísmica, para el periodo de 1960-2017 ( $M \geq 4.0$ ). Sobre el mapa se resalta la ubicación de la ciudad de Ica.

### **2.3.1.1. Sismicidad**

La actividad sísmica del Perú está asociada al proceso de subducción y a la deformación cortical, siendo la primera causante de los sismos de mayor magnitud que ocurren en Perú. En la Figura 10, se presenta la distribución de sismos ocurridos entre 1960 al 2017 (IGP, 2018), donde los sismos son clasificados según su profundidad, evidenciando que la mayor acumulación de energía y deformación se registra en diferentes sectores de la costa (Villegas et. al. 2016), como es la región Ica.

El departamento de Ica, por su ubicación, presentar el mayor índice de sismicidad debido básicamente a que incide de manera frontal, desde el Oeste, la Dorsal de Nazca. Esta situación genera la ocurrencia de sismos de magnitudes tan pequeñas como 0.5ML hasta del orden de 8.0 Mw. Históricamente, los sismos más importantes son los ocurridos en los años 1942 y 1996, ambos conocidos como sismos de Nazca; además del ocurrido en el año 2007 conocido como sismo de Pisco.

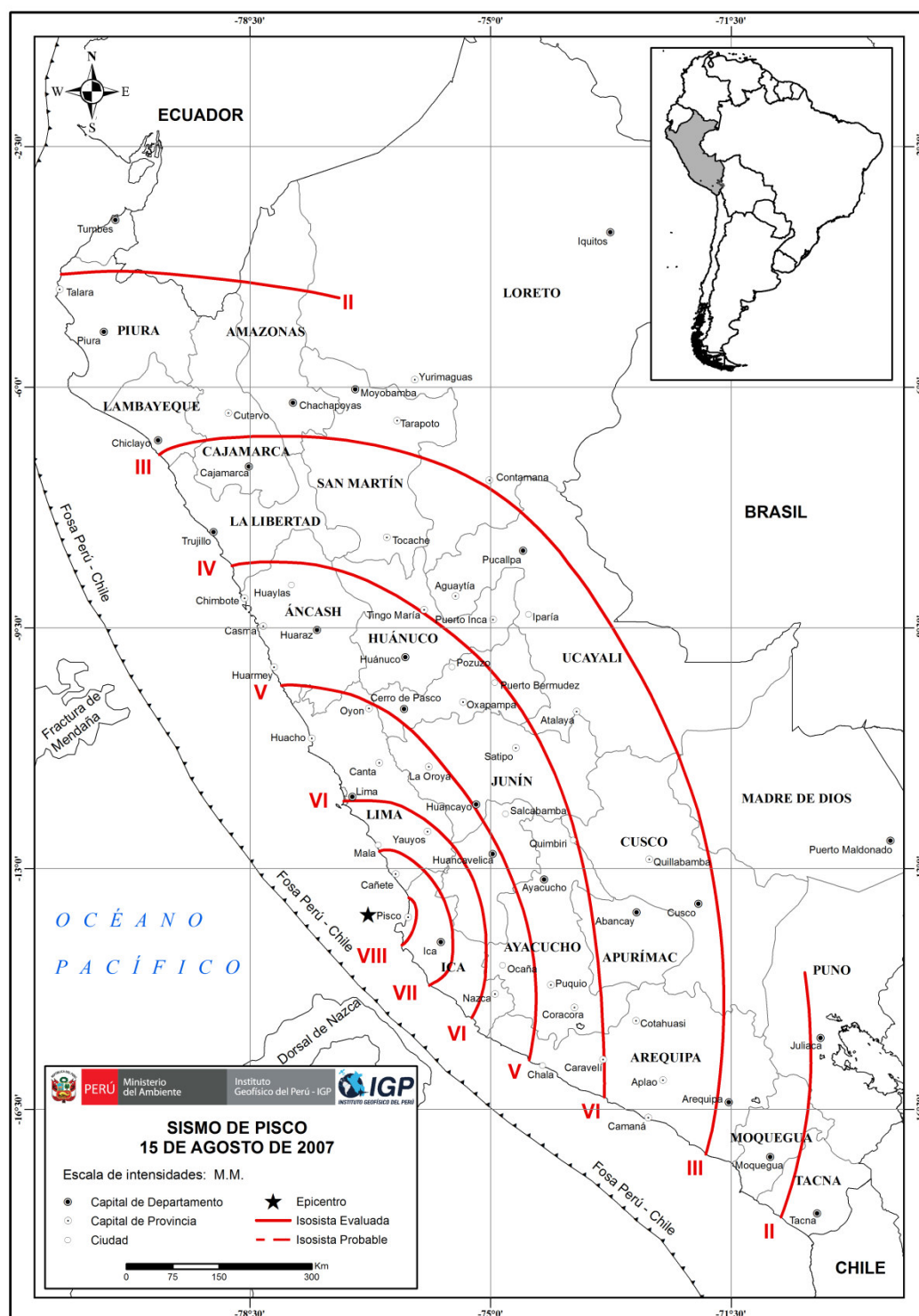
El movimiento sísmico de 1996 fue catalogado como el sexto de los grandes eventos producidos en dicha región desde 1940. Su epicentro se ubicó en el mismo sitio donde se produjo el sismo del 24 de agosto de 1942 ( $M_w = 8.0$ ); frente a la Dorsal de Nazca. Según el mapa de intensidades (Figura 11), la máxima de VII (MM) fue evaluada en un radio de 150 km, siendo el evento sensible hasta distancias del orden de 500 km. Autores como Tavera et al (1998), sugieren que el terremoto de 1996 es repetitivo del ocurrido en el año 1942.



**Figura 11.** Intensidades sísmicas regionales (MM), para eventos ocurridos en 1942 y 1996. Fuente: IGP.

Recientemente, el terremoto de Pisco ocurrido en agosto de 2007 (8.0 Mw), produjo daños en más de 70 localidades (Figura 12), con intensidades máximas evaluadas de “VII-VIII (MM)” en Pisco, Chincha, Cañete e Ica. El movimiento en Pisco fue sentido por el norte hasta la ciudad de Piura y por el sur hasta Arequipa. Hacia el interior del país fue sensible hasta la ciudad de Pucallpa ubicada a más de 550 km. La línea de isosista de IV (MM) tiene un eje mayor de 600 km y menor de 450 km en dirección Este. En la ciudad de Ica, el mayor daño producido por el sismo de Pisco fue en viviendas de adobe y quincha.





**Figura 12.** Intensidades sísmicas regionales (MM), para el evento ocurrido en el 2007. Fuente: Tavera y Bernal (2007).

### **2.3.1.2. Peligro sísmico**

El Perú por su ubicación es altamente sísmica y por lo tanto, es necesario conocer el comportamiento probable de este peligro en un área determinada a fin de planificar y mitigar los efectos que puedan producirse en el futuro. La manera de conocer este comportamiento, es a través de la evaluación del peligro sísmico.

Las investigaciones del riesgo sísmico se iniciaron con Casaverde y Vargas (1980) utilizando la información de la red sísmica mundial en el lapso de 1913 -1976, con la investigación realizada por Castillo y Alva (1993) con las notas de la misma red y de CERESIS para la etapa de 1900-1991, el que generó mayor difusión en las enseñanzas de ingeniería y en la Norma de Construcción Sismorresistente adaptable para el Perú (Norma E030). Otros estudios fueron hechos dentro del Proyecto “Pilot Project for regional Earthquakes Monitoring and seismic Hazard Assessment” (Giardini et al, 1999; Dimate et al, 1999), Bolaños y Monroy (2004), Gamarra y Aguilar (2009) y Ocola (2010). Sin embargo, en todos estos trabajos se ha hecho uso de diversas leyes de atenuación de la aceleración provenientes básicamente de EEUU (McGuire, 1974), además de las propuestas por Casaverde y Vargas (1980) utilizando datos de sismos ocurridos y registrados en el Perú.

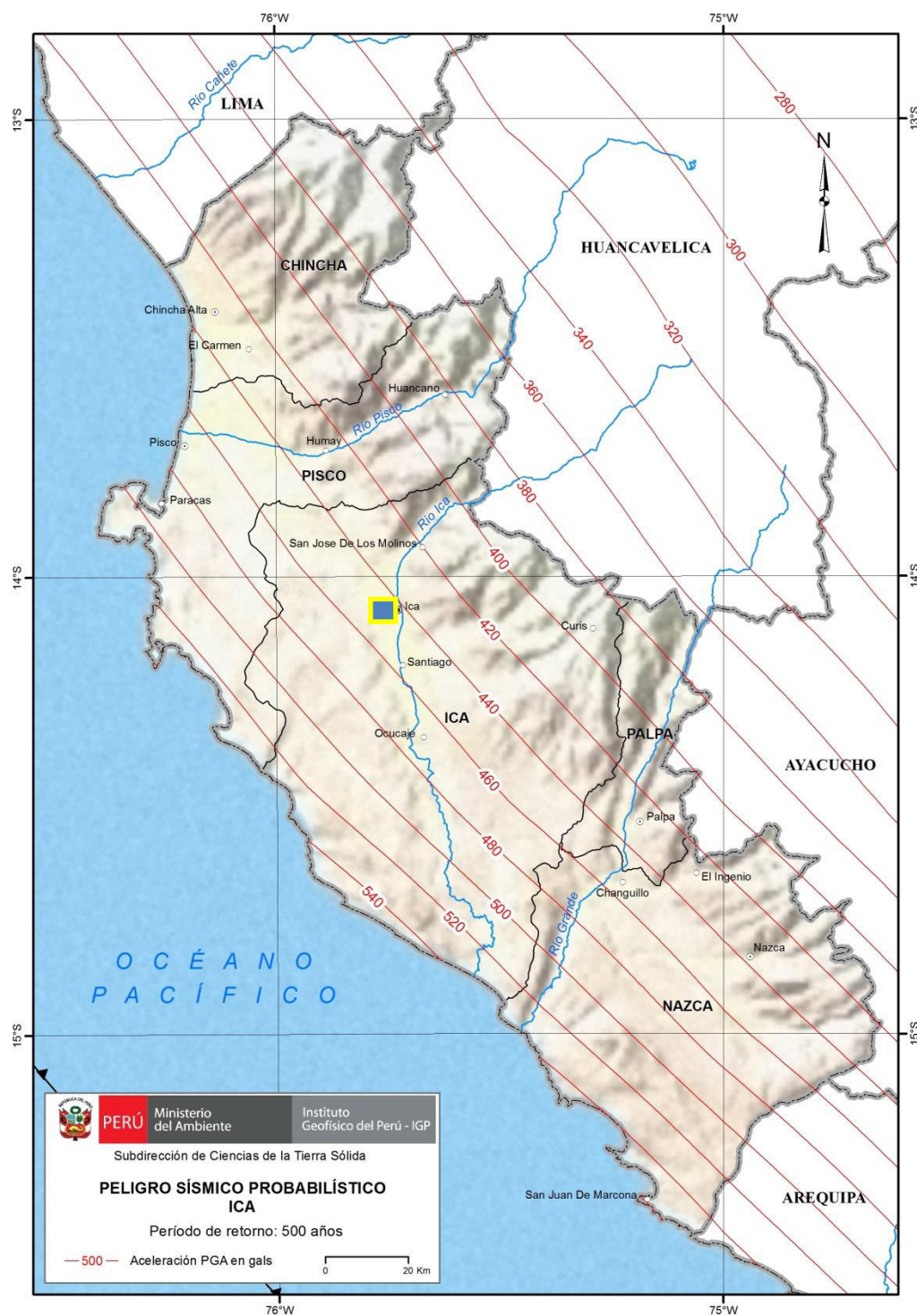
Los resultados de los mapas de peligro sísmico, dependen básicamente del uso de diferentes bases de datos y leyes de atenuación, los cuales permitieron tener variados valores de aceleración para un mismo punto de interés, siendo necesario superar estas diferencias para el mejor conocimiento del peligro sísmico en el Perú.

El mapa de peligro sísmico para la ciudad de Ica es calculado haciendo uso de datos sísmicos para el periodo 1960 – 2012 (Tavera et al. 2014) proveniente de la unificación de tres catálogos, el primero del IGP, el segundo de Engdahl y Villaseñor (2002) y el tercero del United States Geological Survey (USGS). El peligro sísmico probabilístico se obtiene siguiendo la metodología propuesta y desarrollada por Esteva (1968), Cornell (1968) y el programa de cómputo CRISIS-2007 (Ordaz, 2007). En el cual se propuso “33 nuevas fuentes sismogénicas en base a la

distribución espacial de la sismicidad asociada al proceso de subducción, a los principales sistemas de fallas (corticales) y a la geometría de la placa de Nazca por debajo del continente (intraplaca)”.

Las curvas de iso-aceleraciones máximas para el departamento de Ica se distribuyen paralelas a la línea de costa coincidiendo con la dirección en la cual se produce el proceso de subducción de la placa de Nazca bajo la Sudamericana. Asimismo, los valores de aceleración disminuyen paulatinamente conforme se tiende hacia el interior del país.

En la ciudad de Ica los valores de aceleración para un periodo de retorno de 500 años son del orden de  $440 \text{ cm/seg}^2$  (Figura 13). Por otro lado, los valores de más de  $500 \text{ cm/seg}^2$  observados en la costa de la ciudad de Ica y Arequipa tienen relación con los sismos ocurridos en los años 1942 (8.0Mw), 1996 (7.7Mw), 2001 (8.0Mw) y 2007 (8.0Mw). En la Norma de construcción sismorresistente E-030 (2018), se propuso la zonificación sísmica del Perú, la región Ica está ubicada en la Zona 4 con aceleraciones máximas de hasta  $450 \text{ cm/seg}^2$ ; para un periodo de retorno de 500 años; sin embargo, este valor puede ser superado en suelos inestables y menos compactos..



**Figura 13.** Mapa del departamento de Ica con la distribución de los valores de aceleración para periodos de retorno de 500 años en  $\text{cm/seg}^2$ . El rectángulo indica la ubicación de la ciudad de Ica.

### 2.3.2. Modelo estructural de la “CUENCA DE ICA”

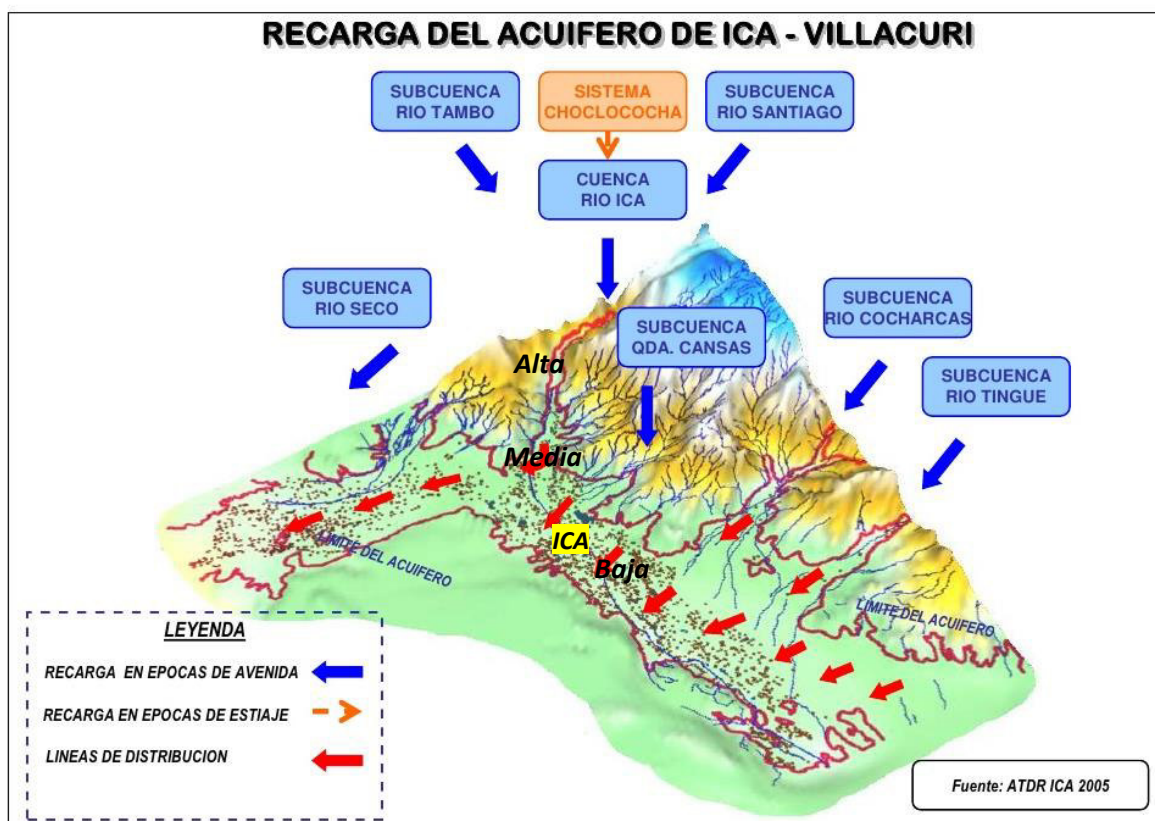
La cuenca se inicia en la laguna de Parinacochas a 4000 m.s.n.m. y desemboca en el Océano Pacífico. A lo largo de esta cuenca, tiene una orografía accidentada con inclinaciones fuertes en los sectores altos y media de la cuenca y hacia el sector bajo de la cuenca, entorno a la ciudad de Ica, la topografía es poco pronunciada formando el valle. Sin embargo, el gran número de subcuencas contribuyentes y el cambio rápido en la de topografía, genera que la vertiente del río es deficiente para drenar los excesos de agua.

El estudio geomorfológico de la cuenca del río Ica (Olivares et. al. 1994), evidencia la presencia de “geoformas y procesos geomorfológicos predominantes en la cuenca del río Ica” siendo sus características las siguientes (Figura 14):

**Cuenca Alta:** presenta altiplanicies que están constituidos principalmente por “pampas, colinas y cadenas de cerros bajos con variaciones locales”. La cuenca, se encuentra en el departamento de Huancavelica, a alturas de entre 800 y 4,400 m.s.n.m. Su particularidad es mostrar una orogenia accidentada cuyas inclinaciones varían de entre 5° a 80° o más.

**Cuenca Media:** presenta estribaciones del frente andino, a alturas de entre 400 a 800 m.s.n.m. Está conformado por una serie de “cerros y el abanico aluvial”. Su característica es tener una prominencia leve a moderado con inclinaciones que oscilan entre 5° a 25°.

**Cuenca Baja:** presenta el Llano aluvial – pampa costera, a alturas que varían entre los 10 a 400 m.s.n.m. Está conformado por una “serie de colinas, cerros bajos, planicies costaneras” que presenta inclinaciones de entre 1° a 10°. En este sector de la cuenca, se establece la urbe de Ica.



**Figura 14.** Esquema de la cuenca del río Ica, cuya pendiente define la parte alta, media y baja de la cuenca. Fuente: Olivares et. al. (1994).

## 2.4. MARCO NORMATIVO

### 2.4.1. Norma Sismoresistente E.030 (2018)

En el país, las edificaciones de obras civiles de distinto tamaño tiene que seguir los criterios técnicos establecidos en la Norma Técnica E.030 “Diseño Sismorresistente” del Reglamento Nacional de Edificaciones, modificada según Decreto Supremo N° 003-2018-Vivienda. En este documento se establece los requisitos mínimos que

deberían cumplirse a fin de construir estructuras sismorresistentes, que ante la ocurrencia de un sismo de gran magnitud, presento daños mínimos.

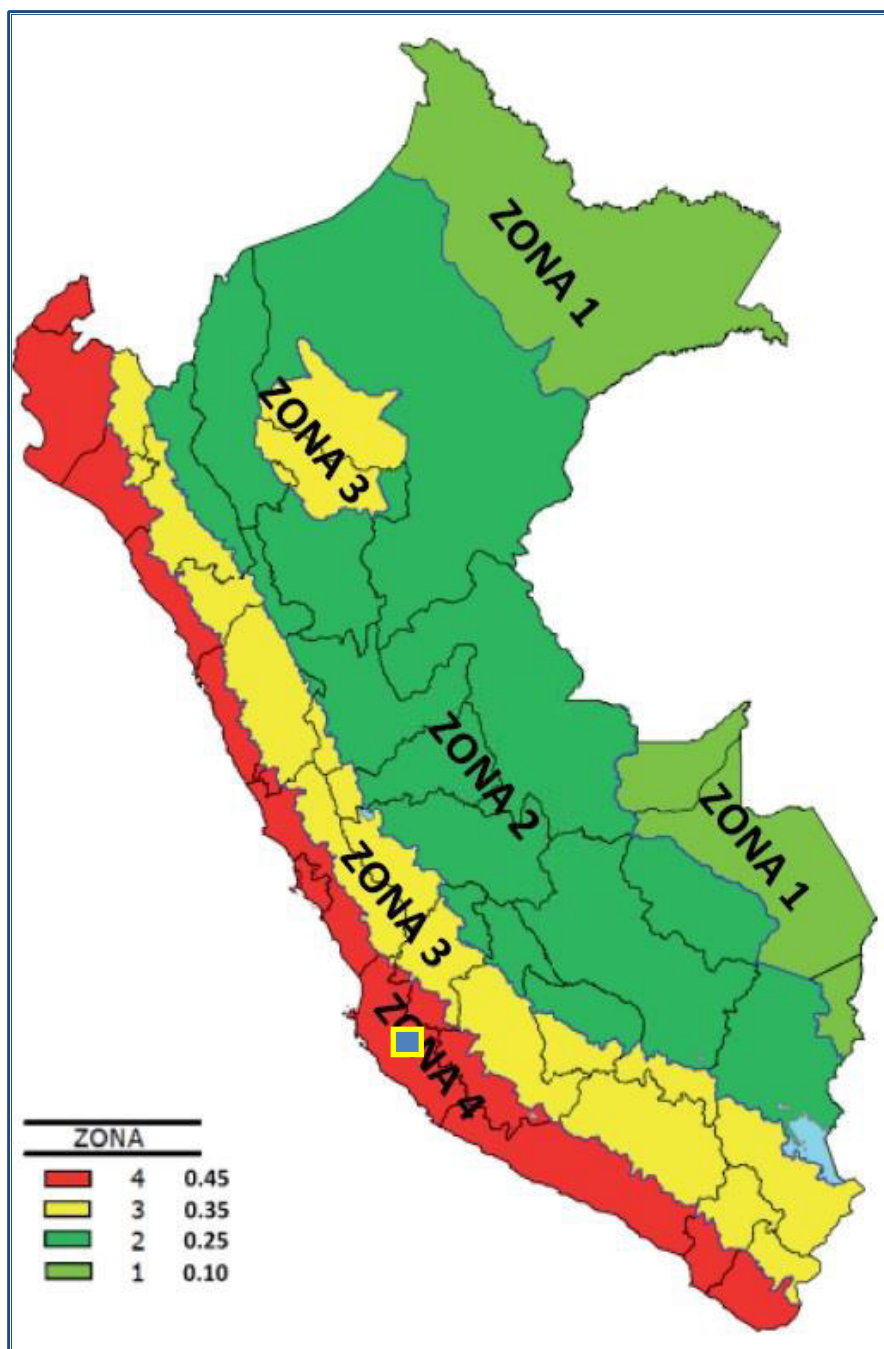
#### **2.4.2. Zonificación del Perú**

En la normativa E.030, se sectoriza el territorio peruano en cuatro zonas, de acuerdo al mapa de peligro sísmico, obtenidos en base al catálogo sísmico, fuentes sismogénicas y curvas de atenuación. A través de este mapa, se puede conocer de manera regional las variaciones del peligro sísmico expresado en aceleraciones promedio, que pueda afectar a una estructura, de ahí el ingeniero civil puede proyectar o construir edificios que soporten tal sacudimiento.

De acuerdo a la Figura 15, la Zona 4, ubicada en la zona costera, presenta las mayores solicitancias sísmicas y presenta valores promedio de 0.45 g; la zona 3, aceleraciones 0.35g; la zona 2 y 1, valores de 0.22g y 0.1g respectivamente.

El departamento de Ica, y por ende la ciudad, está localizada en la Zona 4, evidenciando su alta susceptibilidad a ser afectada por una mayor sollicitación sísmica, de ahí que el ingeniero civil debe proyectar o construir edificios que soporten tal sacudimiento. De manera local, es necesario considerar los efectos de sitio que pudieran incrementar este sacudimiento siendo perjudicial para determinadas edificaciones. Sin embargo, también estos daños pueden asociarse al deterioro, antigüedad y autoconstrucción de las edificaciones.





**Figura 15.** Zonas sísmicas, propuestas por la Norma E.030, a partir del mapa de peligro sísmico. El rectángulo indica la ubicación de la ciudad de Ica.



### 2.4.3. Clasificación de los tipos de suelos

Básicamente, la Normativa E.030 considera perfiles de suelos en función de sus propiedades geotécnicas, velocidades  $V_{s30}$ . En el caso de suelos granulares, considera el promedio ponderado de los  $N_{60}$  (SPT, Standard Penetration Test), o el “promedio ponderado de la resistencia al corte en condición no drenada  $S_u$  para suelos cohesivos”.

La Norma E.030 establece 5 perfiles, y cuyos tipos de suelo presentan las siguientes características:

- **Perfil Tipo  $S_0$ : Roca Dura**, corresponde a rocas inalteradas con  $V_{s30}$  mayor a 1500 m/s.
- **Perfil Tipo  $S_1$ : Suelos Muy Rígidos**, corresponden a suelos consistentes y/o conformados por rocas fracturadas con  $V_{s30}$  de entre 500 y 1500 m/s. Presentan una capacidad de carga de 5 kg/cm<sup>2</sup> a más.
- **Perfil Tipo  $S_2$ : Suelos Intermedios**, corresponde a suelos medianamente consistentes, con  $V_{s30}$  de entre 180 y 500 m/s. Presenta una capacidad de carga de entre 0.5 a 1.0 kg/cm<sup>2</sup>.
- **Perfil Tipo  $S_3$ : Suelos Blandos**, corresponden a suelos poco consistentes, con  $V_{s30} < 180$  m/s. Presenta una capacidad de carga menor a 0.5 kg/cm<sup>2</sup>.
- **Perfil Tipo  $S_4$ : Condiciones Excepcionales**, corresponde a suelos excepcionalmente flexibles y sitios donde las condiciones geológicas y/o topográficas son particularmente desfavorables; por lo tanto, se requiere efectuar estudios específicos para el sitio.

**Tabla 1.** Perfiles de suelo ( $V_{s30}$ ) definidos en la “Norma Técnica E.030, de diseño sismorresistente (2018)”.

Perfil	$V_{s30}$ (m/s)	Descripción
$S_0$	$> 1500$	Roca dura
$S_1$	500 a 1500	Roca o suelo muy rígido
$S_2$	180 a 500	Suelo intermedio
$S_3$	$< 180$	Suelo blando
$S_4$	Clasificación basada en EMS	Condiciones Excepcionales

#### 2.4.4. Comportamiento dinámico de los suelos

Depende principalmente de las características estratigráficas del suelo y de las irregularidades topográficas que acondicionan a la geología superficial. Los espesores (E), “velocidades de ondas de corte ( $V_s$ )”, consistencia de los diferentes estratos, la frecuencia predominante de respuesta de los suelos y las amplificaciones máximas, son parámetros físicos y dinámicos, que permiten clasificar los suelos entre rígidos y blandos. Los suelos blandos, presentan características locales excepcionales que ante la ocurrencia de un sismo, contribuyen con la inestabilidad y daños en las edificaciones que se construyen sobre ellos. (ver Figura 16).

Este estudio tiene por finalidad, analizar el “**comportamiento dinámico de los suelos**”, en razón que la Intensidad sísmica puede diferir a distancias cortas y áreas pequeñas. De ahí la importancia de tipificar los suelos, en función a su contribución frecuencial y amplificación del sacudimiento del suelo ante la sollicitancia sísmica.



**Figura 16. a)** Edificaciones destruidas, por estar construidas sobre suelos blandos de constitución lacustres. En este caso se experimenta fenómenos de resonancia entre el suelo-estructura a consecuencia del terremoto de Michoacán, México 1985 (8.1 Mw). Fuente: [https://elpais.com/elpais/2015/09/17/album/1442519472\\_091112.html](https://elpais.com/elpais/2015/09/17/album/1442519472_091112.html)



**Figura 16. b)** Viviendas destruidas por asentarse sobre suelos blandos con presencia de alto nivel freático. Obsérvese los procesos de licuación de suelos como consecuencia del terremoto de Pisco 2017 (8.0 Mw).

### 2.4.5. Zonificación sísmica de suelos

En general, para cualquier estudio de edificación y planificación urbana, se debe tener en cuenta las características del suelo que detalle los contextos locales de las zonas de interés. En este análisis, la “Zonificación Sísmica – Geotécnica de la ciudad” se desarrolla un análisis minucioso de las particularidades mecánicas y dinámicas de los suelos. De acuerdo a la metodología seguida por Instituto Geofísico del Perú (IGP), se establecieron 4 zonas que están conformadas de la siguiente manera:

**ZONA I:** Comprende a suelos Tipo S1, cuyas  $V_{s30}$  fluctúan entre 500 y 1500 m/s, correspondiendo a suelos rígidos a muy rígidos, conformados por estratos de material gravoso. Predominan periodos de entre 0.1 y 0.3 seg.

**ZONA II:** Comprende a suelos Tipo S2, cuyas velocidades  $V_{s30}$  fluctúan entre 180 y 500 m/s, correspondiendo a suelos medianamente rígidos. Esta zona está conformada por estratos superficiales finos y suelos arcillosos con espesores de hasta 10 m., subyaciendo a capas de material gravosos. Predominan periodos de entre 0.3 y 0.5 seg.

**ZONA III:** Comprende a suelos Tipo S3, cuyas velocidades  $V_{s30}$  son menores a 180 m/s, siendo de consistencia blanda. Esta zona está conformada por estratos superficiales finos y arenas de gran potencia, que a niveles superficiales se presentan muy sueltos. Los periodos predominantes en esta zona son de 0.5 y 0.7 segundos.

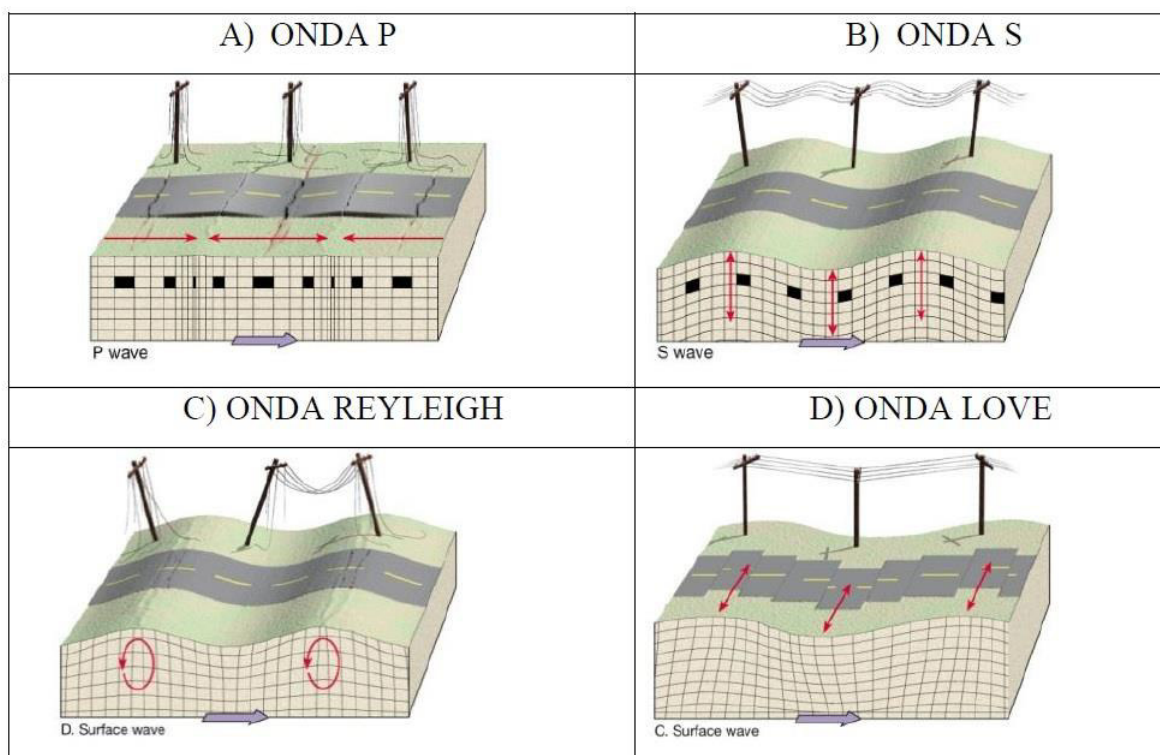
**ZONA IV:** Comprende a suelos Tipo S4, cuyas características físicas y dinámicas son excepcionales. Esta zona está conformada por: a) Depósitos eólicos, fluviales, marinos y/o suelos pantanosos. b) Zonas de topografía irregular, susceptibles a generar derrumbe, flujos detríticos. c) Depósitos de relleno sueltos, desmontes heterogéneos y rellenos sanitarios.

## 2.5. MARCO CONCEPTUAL

### 2.5.1. Propagación de las ondas sísmicas

La energía liberada por un sismo que se propaga a través de medios elásticos se irradia desde su epicentro hasta la superficie en forma de ondas elásticas (Figura 17), atravesando diferentes medios. Las ondas sísmicas se clasifican en dos tipos (Aki y Richard 1980; Sauter, 1989):

- a) **Ondas de Cuerpo**, se transmiten por las diferentes capas del subsuelo y son las primeras en registrarse en superficie por que transmiten las primeras vibraciones del suelo producidas por el sismo. Estas se dividen en primarias (P) o longitudinales y secundarias (S) o transversales; estas últimas, son las ondas de cizalla o corte, que afectan directamente a las estructuras por su modo de propagación. Asimismo, su movimiento se puede descomponer en su plano vertical (SV) y horizontal (SH), debido a las múltiples reflexiones y refracciones que sufre al pasar de un medio a otro con diferentes características (Semblat et al., 2002).
- b) **Ondas superficiales**, viajan a través de la superficie de la tierra, entre medios con propiedades elásticas distintas, presentan velocidad de propagación menor a las ondas de cuerpo. Estas se dividen en ondas Love y las de Rayleigh, siendo las últimas, por su forma de propagarse, las más utilizadas en el campo de la ingeniería (Kanamori, 1977; Sauter 1989; Xia et al., 1999; Foti, et al., 2014). Las ondas Love, generan movimientos en el terreno horizontales en sentido perpendicular al curso de transmisión y se originan de la “reflexión de una onda SH con la superficie libre para luego sufrir múltiples reflexiones entre la capa inferior y la superficie libre” (Foti, 2000). Las Ondas Rayleigh, tienen un movimiento elíptico y retrogrado, y se origina de la interferencia de las ondas P y SV.

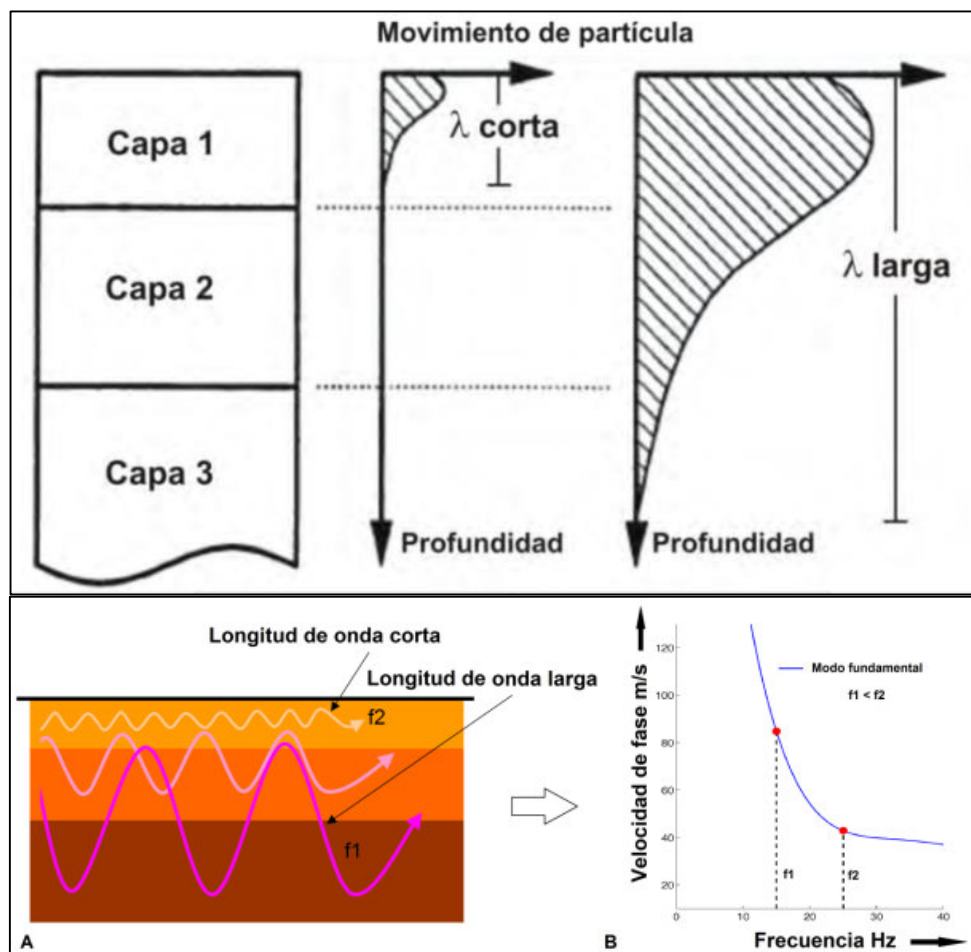


**Figura 17.** Esquema del movimiento de las partículas de las ondas de cuerpo y superficiales. Fuente: Imagen tomada de Sauter (1989).

### 2.5.2. Propiedades dispersivas de las ondas Rayleigh

En un depósito de suelos homogéneos, las ondas Rayleigh se propagarán de manera independiente de su longitud de onda, pero si consideramos que estos tienen características mecánicas diferentes, como son la rigidez, densidad y elasticidad, en este caso sí dependerá de esta longitud. Del mismo modo, si la longitud de onda es mayor, esta alcanzará mayor profundidad y si la longitud de onda es menor, se propagará a niveles más superficiales. Entonces, la velocidad depende de la frecuencia (Hz), se inicia el proceso dispersivo (Aki y Richard 1980; Matthews et. al, 1996).

La tendencia de la curva de dispersión, permite estimar los patrones mecánicos del medio. Si el medio fuese igual no generaría dispersión por ser la velocidad ( $V_r$ ) uniforme. En el caso de medios estratificados, las oscilaciones a cada frecuencia se propagarán a una velocidad diferente. Las bajas frecuencias corresponden a depósitos sedimentarios con gran espesor y las altas, a depósitos de menor espesor. (Figura 18)



**Figura 18.** Esquema del movimiento de la partícula en profundidad, su relación con la frecuencia y la representación gráfica de la dispersión. Fuente: SESAME (2009).

De modo general, las ondas Rayleigh, se caracterizan por presentar propiedades dispersivas, presentar baja velocidad, baja frecuencia y gran amplitud. Sin embargo, el 67% de la energía sísmica se propaga en esta onda, siendo su velocidad ( $V_r$ ) menor que las ondas S ( $V_r = 0,92 V_s$ ). En esta investigación, se recurrirá al procedimiento de “Análisis Multicanal de Ondas Superficiales MASW” para obtener la curva de dispersión de las O. Rayleigh (Park, et. al., 2007; 2008).

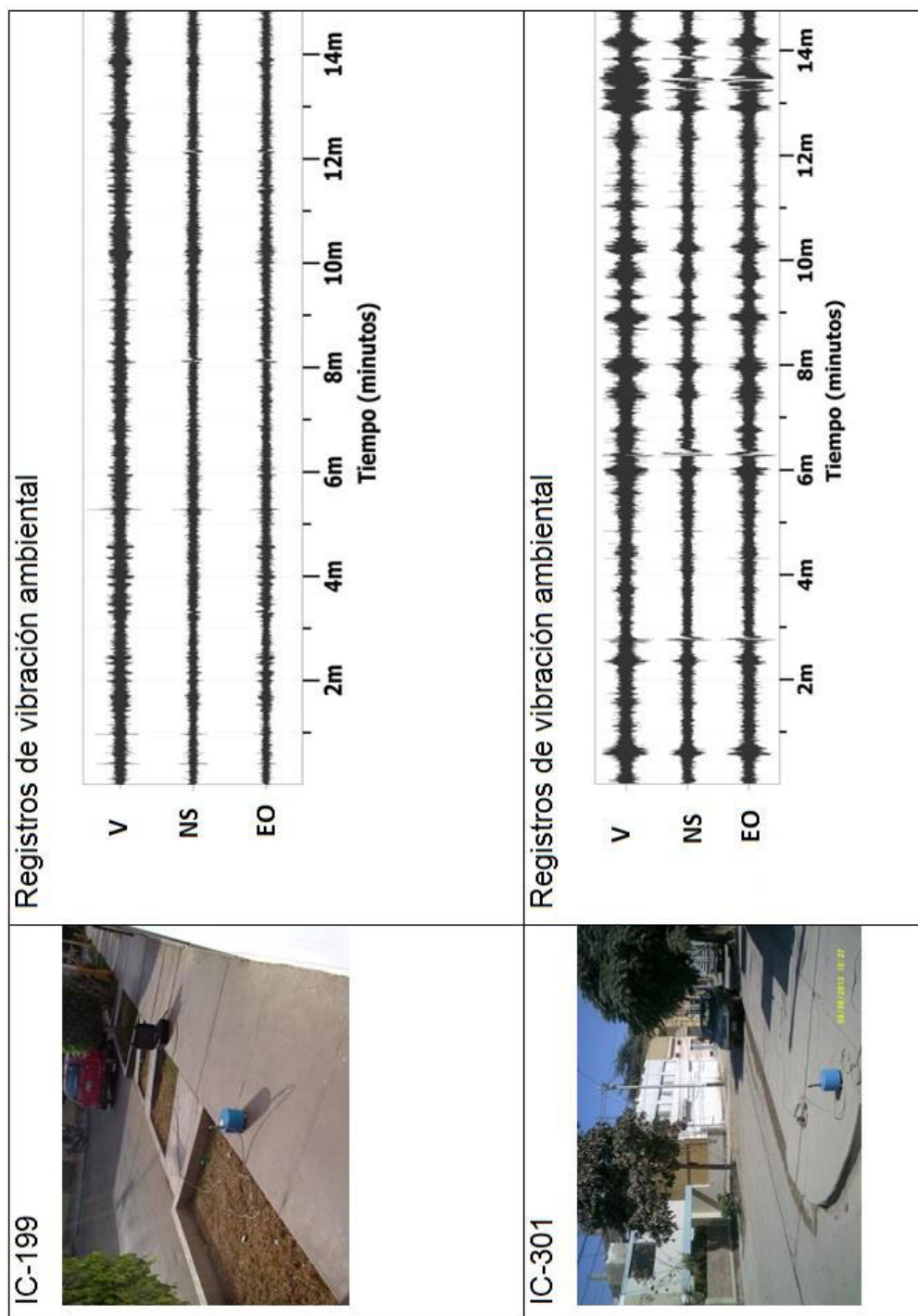
### 2.5.3. Vibraciones ambientales

Los microtremores o vibraciones ambientales se definen como las vibraciones del suelo originados por causas no sismogénicas y se catalogan en movimientos naturales y artificiales. La primera asociada a fluctuaciones provocadas por “las olas oceánicas, tormentas, vientos, presión atmosférica, actividad volcánica” y la segunda, asociada a la actividad humana, como el “tráfico vehicular, el paso de peatones, maquinaria industrial, explosiones” (Kanai et. al. 1954). Estas ondas fluctúan entre valores de 0.01 a 30 Hz y están conformadas principalmente por ondas Rayleigh. Según Aki (1957).

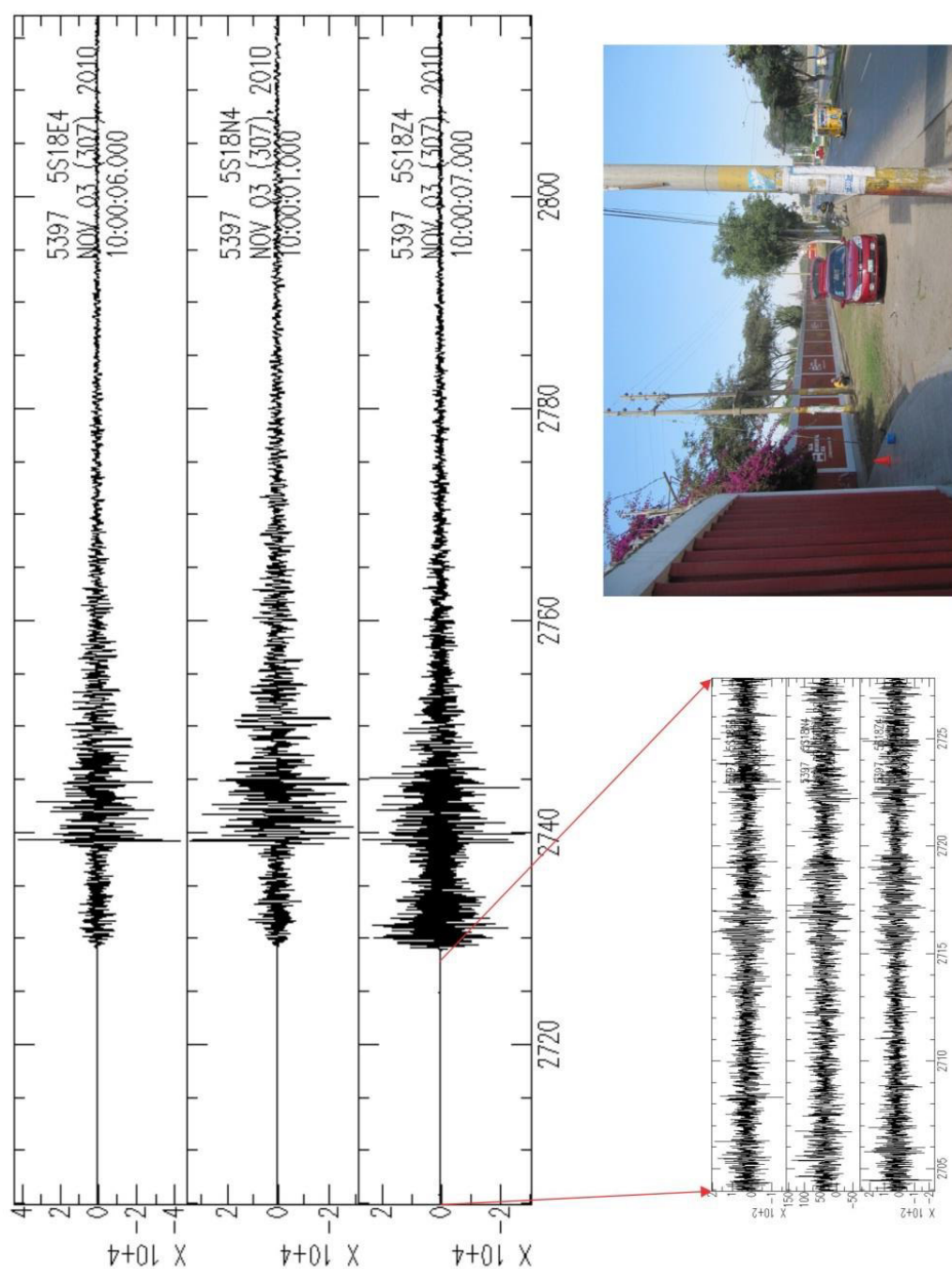
Los microtremores, según el rango de frecuencias predominantes ( $F_0$ ), se asocian a diferentes fuentes, como son: 1)  $F_0 < 1.0$  Hz, corresponden a vibraciones generadas por el oleaje del mar, 2)  $F_0 > 1.0$  Hz, son debidos a la presencia de depósitos profundos y 3)  $F_0 > 5.0$  Hz, son debidos a depósitos superficiales blandos (SESAME, 2009; Bernal, 2006).

En la Figura 19 se presenta registros de vibración ambiental adquiridos en Ica, en un punto ubicado próximo a la zona rocosa donde presenta menor ruido de fondo a diferencia del punto ubicado en el centro de la ciudad, donde el ruido de fondo es continuo y de mayor amplitud. Asimismo, se muestra una señal sísmica obtenida en la Ciudad de Ica, donde se extrajo el ruido sísmico de fondo o vibraciones continuas del subsuelo registradas antes del registro del evento, evidenciando que el ruido que se propaga por el suelo de Ica, es continuo y las fuentes son diversas.





**Figura 19. a)** Imágenes de registro de vibraciones ambientales obtenidas en puntos ubicados en zonas donde el ruido de fondo presentan mínimas y mayores amplificaciones. Componentes, NS y EO.



**Figura 19. b)** Registro de una señal sísmica obtenida en la ciudad de Ica, donde se extrajo el ruido sísmico de fondo o vibraciones continuas del subsuelo registrado en el punto de observación.

### 2.5.4. Métodos geofísicos de exploración

La geofísica es la ciencia que se encarga del estudio de la Tierra enfocado en la física y como ocurre en otras ciencias, la geofísica se divide en Geofísica Pura y Aplicada. Se denomina pura a la investigación de la tierra con fines científicos y aplicada a la investigación con fines de exploración que mediante métodos cuantitativos que permiten la localización de recursos naturales y/o conocer las propiedades físicas - dinámicas (densidad, espesor,  $V_{s30}$ , frecuencias) de los estratos del subsuelo donde se desarrolla las ciudades, construyen sus viviendas, infraestructura y/o construcción en general.

Los métodos geofísicos son métodos indirectos que utilizan para la exploración de suelos fuentes activas o pasivas. Las fuentes activas, es cuando se estimula el subsuelo por medios artificiales, como la inducción de corriente eléctrica para los estudios de prospección eléctrica, generación de ondas sísmicas mediante el golpe de un matillo o bola de acero, para los métodos de refracción y reflexión sísmica, entre otros. Las fuentes pasivas, permiten detectar las variaciones naturales de los campos, magnéticos, gravimétricos, telúricos, vibraciones ambientales y otros propios del suelo.

### 2.5.5. Terminología

**Amplitud:** Se refiere a la cantidad de la energía que experimentaron los diferentes rangos de frecuencia de la señal sísmica y es expresada en “número de veces” y/o decibeles (dB).

**Análisis de Fourier:** El proceso de descomposición de una función de tiempo o espacio en una suma (o integral) de funciones sinusoidales (senos o cosenos) con amplitudes y fases específicas.

**Dispersión:** Cambio de la velocidad de las O. Rayleigh en función de la frecuencia.

**Daños estructurales:** Es el daño que se genera en las estructuras debido al sacudimiento del suelo producto de terremotos; como correlación directa de la

deficiencia de un elemento o serie de elementos con flexibilidad o fortaleza insuficiente.

**Efectos de sitio:** Son alteraciones en el contenido frecuencial que sufren las oscilaciones sísmicas cuando arriban a la superficie. Si es poco consistente el suelo, experimentará mayor amplificación.

**Frecuencia:** Se mide en Hercios (Hertz, Hz) y permite saber a cuantos ciclos (longitud de onda) por segundo viaja una onda. A mayor frecuencia, más superficial es la propagación de la ondas y a menor frecuencia, más profunda es su propagación.

**Zonificación:** Delimitación de suelos con similares características físicas y/o dinámicas.

**Ondas Sísmicas:** Transmisión de la energía sísmica en modo de oscilaciones elásticas

**Periodo:** Es el tiempo que transcurre entre dos crestas sucesivas de ondas sísmicas.

**Ruido sísmico:** El ruido incluye las perturbaciones de los datos sísmicos causadas por una fuente regional o local que enmascara la señal sísmica.

**Resonancia:** En el momento que la fase del movimiento de la estructura y del suelo son concordantes, causando que los efectos sísmicos se amplifican, pudiendo producir el colapso de la estructura

**Sismos:** es un fenómeno natural que consiste en el movimiento súbito de la corteza asociados a fenómenos tectónicos.

**Vibración ambiental:** Vibraciones constantes generadas por la acción de las personas o fenómenos naturales, que se inducen al subsuelo.

### 3.1.1. Hipótesis general

### 3.1.2. Hipótesis específicas

**H3:** Influye directamente la profundidad de la interfase suelo-roca en la respuesta dinámica de los suelos de la ciudad de Ica.

### 3.2.1. Identificación de las variables

[illegible]

	Topografía
	Geología superficial
-Variables dependientes (Y):	Comportamiento dinámico del suelo
	-Frecuencia predominante del suelo
	-Amplificaciones máximas relativas
	-Velocidad de ondas de corte
	-Tipo de suelo
-Variables intervinientes:	Factores sismotectónicos
	-Frecuencia de sismos

## **-CLASIFICACIÓN DE VARIABLES**

### **•VARIABLE:** Condiciones Geo-Ambientales

*Por la función que cumple en la hipótesis:* Variable independiente

*Por la posesión de las características:* Variable continua

*Por el tipo de medición de la variable:* Variable continua

**Condiciones Geo-Ambientales:** Es la información que se obtiene de un conjunto de ciencias que se ocupa de temas relacionados con el conocimiento que se tiene de la superficie y el medio ambiente. Son ciencias interdisciplinarias, ya que se encargan de aspectos de la geología, geomorfología, hidrogeología, y geofísica que ayudan, desde un punto de vista ambiental, territorialmente realizar su zonificación ambiental. Asimismo, permite definir las áreas físicamente más vulnerables ante la ocurrencia de terremotos.

●**VARIABLE:** Geomorfología de la cuenca de Ica

*Por la función que cumple en la hipótesis:* Variable independiente

*Por la posesión de las características:* Variable continua

*Por el tipo de medición de la variable:* Variable continua

**Geomorfología de la cuenca de Ica:** La cuenca de la ciudad de Ica, es un espacio territorial “limitado por las partes más altas de las montañas, laderas y colinas, en el que se desarrolla un sistema de drenaje superficial que concentra sus aguas en el cauce del río Ica” (Faustino, 1995) y en cuyos márgenes se asientan diversos distritos de Ica. La geomorfología de esta cuenca es variable, y depende de los eventos tectónicos que ocurrieron para su formación, contiene el material arrastrado por el río y depositado en sus márgenes. En este sentido, la cuenca presenta un medio ambiente complejo, que influye en las particularidades físicas y dinámicas de los suelos donde se asienta la población.

●**VARIABLE:** Topografía

*Por la función que cumple en la hipótesis:* Variable independiente

*Por la posesión de las características:* Variable continua

*Por el tipo de medición de la variable:* Variable continua

**Topografía:** Se refiere a la descripción de las muestras de relieves superficiales, su nexo con su configuración geológica local o ciclos orogénicos, que se apoya en la lectura de curvas de nivel, mediante un levantamiento topográfico, mediante imágenes satelitales, planimetría o drones.

Las condiciones y procesos geomorfológicos, abarca, elementos del relieve (valles, terrazas, laderas, escarpes, entre otros) y su correlación de la geología con el principio

de las formas geomorfológicas y procesos tectónicos.

●**VARIABLE:** Geología superficial

*Por la función que cumple en la hipótesis:* Variable independiente

*Por la posesión de las características:* Variable continua

*Por el tipo de medición de la variable:* Variable continua

**Geología superficial:** se refiere a la información obtenida del material expuesto en superficie, la misma que está generalmente compuesta de sedimentos granulares sueltos. La geología del suelo rocoso se refiere a la base de roca sólida debajo de los materiales superficiales definidos por formaciones y eras geológicas.

●**VARIABLE:** Comportamiento dinámico del suelo

*Por la función que cumple en la hipótesis:* Variable dependiente

*Por la posesión de las características:* Variable continua

*Por el tipo de medición de la variable:* Variable cuantitativa

**Comportamiento dinámico del suelo:** Es la respuesta del suelo al interactuar con los movimientos telúricos; por lo tanto, depende de las propiedades físicas del suelo como son su estratigrafía, composición geológica y geometría de las capas superficiales (Sauter, 1989; Chavez-Garcia et al., 1999; Reinoso, 2000; Leyva, 2004). A la hora de evaluar dicho comportamiento, se identifica zonas con efectos de sitio donde una onda puede ser amplificada o de-amplificada, de acuerdo a la variación de sus propiedades físicas, como son los espesores, densidad, rigidez de las diferentes capas. Asimismo, sus propiedades dinámicas son definidas por la frecuencia predominante del suelos y sus amplificaciones máximas relativas. De acuerdo al comportamiento físico-dinámico del suelo, este se clasifica en 5 tipos de suelos (Norma E.030).



●**VARIABLE:** Factores sismotectónicos

*Por la función que cumple en la hipótesis:* Variable independiente

*Por la posesión de las características:* Variable continua

*Por el tipo de medición de la variable:* Variable continua

**Factores sismotectónicos:** Son evidenciados por la evolución geodinámica, la distribución geográfica y temporal de los sismos que afectan a la zona de estudio; así como, las características geo-ambientales que esta presenta. La evolución geodinámica de la región de Ica, ubicada próxima a la línea de costa, es regida por la subducción de la placa de Nazca sobre la cual se encuentra la Dorsal de Nazca bajo la placa Sudamericana, generando que la zona, desde un punto de vista sismo tectónico, sea más compleja.

Los movimientos relativos entre estas placas, han determinado la evolución tectónica de sus límites así como la transmisión de esfuerzos intraplaca (Udías y Buforn, 1985). Este proceso es evidenciado por la significativa sismicidad aquí producida. A escala regional, destaca una alineación de sismos que corresponde con el trazado de la propia dorsal de Nazca. Este proceso compresivo, genera el engrosamiento y la orientación de la cordillera Andina.

### 3.2.2. Operacionalización de las variables

La operacionalización es el proceso de expresar los conceptos, términos o variables con indicadores y medidas observables y ellas se detallan en la Tabla 2.

**Tabla 2.** Operacionalización de variables.

<b>Variable</b>	<b>Tipo de variable</b>	<b>Definición conceptual</b>	<b>Dimensiones</b>	<b>Indicadores</b>	<b>Escala de medición</b>
<b>Variable independiente (X):</b> Condiciones Geo-Ambientales	<b>Cuantitativa Continua</b>	<b>Geomorfología de la cuenca</b>	<b>Regular Irregular</b>	Forma: -Concava -TipoV -Combinada	<i>Razón (0)</i>
	<b>Cuantitativa Continua</b>	<b>Topografía</b>	<b>Pendiente</b>	Alta (>30°) Media (30°-10°) Baja (<10°)	<i>Razón (0)</i>
	<b>Cuantitativa Continua</b>	<b>Geología</b>	<b>Tipo de unidad geológica:</b>	Cuaternarios Terciarios	<i>Razón (0)</i>
<b>Variable dependiente (Y):</b> Comportamiento dinámico del suelo	<b>Cuantitativa Continua</b>	<b>Frecuencia predominantes del suelo (Fo)</b>	<b>Rangos</b>	▪Fo <1.0 Hz ▪Fo: 1.0-10.0Hz ▪Fo >10.0 Hz	<i>Razón (0)</i>
		<b>Amplificaciones máximas relativas</b>	<b>Rangos</b>	Alto (> 5) Medio (2-5) Bajo (<2)	<i>Razón (0)</i>
		<b>Velocidad de Ondas de corte</b>	<b>Intervalos</b>	▪>1500 m/s ▪500 a 1500m/s ▪180 a 500 m/s ▪<180 m/s	<i>Razón (0)</i>
		<b>Tipo de Suelo</b>	<b>Perfiles</b>	Suelo So Suelo S1 Suelo S2 Suelo S3 Suelo S4	<i>Razón (0)</i>
<b>Variable interviniente:</b> Factores sismotectónicos	<b>Cuantitativa Continua</b>	<b>Potencial sísmico</b>	<b>Zonas</b>	Alto Medio Bajo	<i>Razón (0)</i>

### 3.2.3. Matriz de consistencia

**Tabla 3.** Matriz de consistencia. “Condiciones Geo-Ambientales y su Influencia en el Comportamiento Dinámico de los Suelos de la Ciudad de Ica”

PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	OBJETIVO DE LA INVESTIGACIÓN	VARIABLES CLASIFICACIÓN PROCESO DE OPERACIONALIZACIÓN	TIPO DE INVESTIGACIÓN	MARCO TEÓRICO	HIPÓTESIS CLASIFICACIÓN	POBLACIÓN MUESTRA	INTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS
<p><b>Problema General</b></p> <p>¿Cuál es la relación entre las condiciones geo-ambientales locales y el comportamiento dinámico de los suelos de la ciudad de Ica, a bajas frecuencias ante la ocurrencia de sismos?</p>	<p><b>Objetivo General</b></p> <p>Determinar la relación entre las condiciones geo-ambientales y el comportamiento dinámico de los suelos de la ciudad de Ica a bajas frecuencias, ante la ocurrencia de sismos.</p>	<p><b>Variable independiente:</b></p> <p>Condiciones Geo-Ambientales</p> <p><b>Variable dependiente:</b></p> <p>Comportamiento Dinámico de los Suelos</p>	<p><b>Investigación:</b></p> <p>Descriptiva</p> <p>Correlacional</p> <p><b>Diseño de Investigación:</b></p> <p>Transversal (Recolecta información por una única vez)</p>	<p><b>Antecedentes:</b></p> <p>-Ámbito Nacional</p> <p>-Ámbito Internacional</p>	<p><b>Hipótesis General</b></p> <p><b>H:</b> Existe relación entre las condiciones geo-ambientales de la cuenca de Ica con el comportamiento dinámico de los suelos de la ciudad de Ica a bajas frecuencias ante la ocurrencia de sismos</p>	<p><b>La Población:</b></p> <p>El sub-suelo de la ciudad de Ica</p> <p><b>Muestra:</b></p> <p>-300 puntos de registros de vibración ambiental.</p> <p>-3 Arreglos sísmicos</p> <p>-80 puntos con datos gravimétricos</p>	<p><b>Se desarrolla en 4 etapas:</b></p> <p>1.Recopilación de Información del Marco Teórico</p> <p>2.Metodología de trabajo de campo</p> <p>3.Metodología de Análisis de muestra</p> <p>4.Metodología de realización de Informe Final</p>

<b>Problemas Específicos</b>  -¿Qué relación existe entre la distribución de las frecuencias predominantes del suelo con el espesor del depósito sedimentario?  -¿En qué medida el factor de amplificación máxima relativa se relaciona con los diferentes tipos de suelo?  -¿En qué medida la profundidad de la interfase suelo-roca influye en la respuesta dinámica de los suelos de la ciudad de Ica?	<b>Objetivos Específicos</b>  -Establecer la relación entre la distribución de las frecuencias predominantes del suelo con el espesor del depósito sedimentario.  -Determinar la influencia del factor de amplificación máxima relativa con los diferentes tipos de suelo.  -Determinar la influencia de la profundidad de la interfase suelo-roca con la respuesta dinámica de los suelos de la ciudad de Ica.	<b>Variable interviniente:</b>  Factores sismotéctónicos	<b>Unidades de Análisis:</b>  -Frecuencia predominante (Fo)  -Periodo dominante (seg.)  -Vs (metros/seg.)  -Tipo de suelo  -rígido  -semirrígido  -flexible  -Excepcionales	<b>Marco Teórico:</b>  -Conceptos básicos de la propagación  -Características físicas de los suelos  -Arreglos de estaciones sísmicas  -Análisis frecuencial de los diferentes tipos de onda  -Evaluación del ruido ambiental  -Métodos geofísicos  <b>Marco Conceptual:</b>  -Ondas sísmicas  -Frecuencia  -Periodo dominante  -Vibración Ambiental	<b>Hipótesis Específicas</b>  <b>H1:</b> Existe relación entre la distribución de las frecuencias predominantes del suelo con el espesor del depósito sedimentario.  <b>H2:</b> Existe relación entre el factor de amplificación máxima relativa y los diferentes tipos de suelo  <b>H3:</b> Influye directamente la profundidad de la interfase suelo-roca en la respuesta dinámica de los suelos de la ciudad de Ica	<b>Selección de Muestra:</b>  Es probabilística por que el muestreo es sistemático definido por una grilla de entre 200 y 300 metros de punto a punto.	<b>Instrumentos:</b>  -Sismómetros  -GPS  -Equipo de refracción sísmica  -Equipo de gravimetría  -Calicatas  <b>Análisis e Interpretación de la Información:</b>  -Análisis estadístico  -Análisis de laboratorio  <b>Programas:</b>  ArcGis, Geopsy  Degtra, CRISIS  Winquake

## **CAPITULO 4: METODOLOGÍA**

### **4.1. METODOLOGÍAS PARA EL TRATAMIENTO DE LOS DATOS GEOFÍSICOS**

#### **4.1.1. Caracterización dinámica del suelo**

La caracterización dinámica del suelo, depende de las características físicas de las diferentes capas del subsuelo, así como su estratigrafía, geología, geomorfología superficial y sus espesores. En conjunto, estos definen la frecuencia predominante, su periodo de respuesta y factores de amplificación del suelo. La distribución de estos parámetros permite delimitar los diferentes tipos de suelo e identificar suelos blandos y/o con efectos de sitio por la gran amplificación que pudieran presentar ante la ocurrencia de un sismo. En este estudio se aplica el “método de razones espectrales H/V” propuesto por Nakamura (1989).

##### ***4.1.1.1 Cocientes espectrales H/V***

Permite conocer los parámetros dinámicos del suelo como son la frecuencia fundamental (periodo fundamental) y sus amplificaciones relativas. Nogoshi y Igarashi (1971) introdujeron por primera vez la idea de cocientes espectrales H/V de una estación, y Nakamura (1989, 2000) reafirma que el “cociente es una estimación confiable de la función de transferencia de sitio para ondas S”, permitiendo identificar la frecuencia fundamental de resonancia de depósitos sedimentarios (Lermo y Chávez-Gracia, 1993; Leyton et al., 2010). La ventaja del método es que se puede utilizar registros de sismos o de vibración ambiental cuya fuente generadora es la actividad humana (Kanai y Tanaka, 1961; Okada, 2004).

#### **4.1.2. Caracterización física del suelo**

Para la caracterización física del subsuelo, se aplican diversas metodologías geofísicas, con la finalidad de estimar parámetros como el espesor, velocidades, rigidez y densidad que caracterizan a las diferentes capas del subsuelo. Dependiendo de los objetivos del estudio y de las características de la zona, se aplican metodologías F-K, MASW, MAM y Gravimetría, siendo sus características las siguientes:

##### **4.1.2.1. Método F-K**

Permite hallar la curva de dispersión que caracteriza al suelo y su inversión, los valores de velocidad ( $V_s$ ) para cada estrato identificado. Este método considera “que el arreglo de sensores es atravesado por un frente de ondas planas” (*Lacoss et al. 1969; Kværna y Ringdahl 1986*) de frecuencia, velocidad y curso de transmisión establecidas, dados en un espacio bidimensional definido por el número de onda en dirección  $K_x$ ,  $K_y$  (*Foti et al. 2001, Socco et al. 2010*). Finalmente, la transformación frecuencia – número de onda  $F-K$  (*Tokimatsu, 1992; Zywicki, 1999; Lacoss et al. 1969*), permite obtener la “curva de dispersión de la velocidad de fase de las ondas Rayleigh” de acuerdo a su modo de vibración (*Aki y Richards, 1980*). El modo-fundamental de la ondas Rayleigh, se caracteriza por atenuarse en amplitud conforme aumenta la profundidad, y sus modos superiores (primer-modo, segundo-modo, etc), por presentar variadas amplitudes a diferentes niveles de profundidad (*Wathelet, 2005a; 2008; Fäh et al., 2008*). Asimismo, la naturaleza de los modos superiores, resulta de la contribución constructiva de las reflexiones de las ondas a niveles superficiales del subsuelo (*Aki, 1957; Xia et al., 1999; Foti, 2003; Foti et. al. 2014*).

##### **4.1.2.2. Métodos MASW y MAM**

Ambos métodos, permiten obtener un perfil unidimensional de velocidades ( $V_s$ ), mediante ensayos de medición de ondas superficiales, cuya resolución es diferente a niveles superficiales y profundos respectivamente. Se considera arreglos multicanales de

sensores ubicados en tramos ya establecidos a lo largo de un eje sobre la superficie del área. MASW, considera ondas provocadas por el golpe de un martillo en puntos predeterminados y MAM, el registro de vibraciones ambientales, que mediante el análisis de dispersión y su inversión, permiten determinar el perfil de “velocidad de ondas S (Vs)” (Park *et.al.*, 2007; 2008; Socco *et al.*, 2010).

#### **4.1.2.3.- Método Gravimétrico**

Permite configurar la geometría y proyectar las máximas profundidades del macizo rocoso y/o interfase suelo-roca, a partir de la variación de la aceleración de gravedad sobre el terreno. Los valores de gravedad, son influenciados por todas las masas topográficas que rodean al punto donde son adquiridos.

La distribución de las masas en el subsuelo e interfaces de las capas del suelo, son las fuentes generadoras de la anomalía de la gravedad y contribuyen a esta según sus dimensiones, profundidad y contraste de densidad en relación al medio que la rodea (densidades  $>2\text{gr/cm}^3$  se asocia a rocas y las menores a sedimentos). Asimismo, para hallar la anomalía de Bouguer, se determina la disconformidad de la gravedad entre el valor teórico y el observado reducido al nivel del mar, mediante correcciones de aire libre, Bouguer y topográficas. Finalmente, para definir la máxima profundidad de la interfase suelo-roca, se realizó el espectro de frecuencias en dos dimensiones de los datos de anomalías residual de Bouguer.

#### **4.1.3. Inversión y correlación de los resultados**

Todas las curvas de dispersión, obtenida con los métodos de F-K, MASW, MAM, fueron promediadas y posteriormente invertidas mediante el algoritmo Neighbourhood (Wathelet *et. al.* 2008). Este algoritmo, hace uso de la descomposición de celdas de Voronoi de los parámetros espaciales, basados en una aproximación de la función “misfit”, la cual es redefinida progresivamente durante el proceso de inversión. El Misfit es proporcional al error en el ajuste de la curva empírica con la teórica obtenida con el perfil de velocidad propuesto. Este parámetro debe tender a valores bajos. Para esta aproximación se

genera más de 500 modelos de velocidad hasta considerar un misfit menor a 0.2. La función del misfit es definido por la siguiente ecuación (*Wathelet et al. 2004*).

$$misfit = \sqrt{\sum_{i=1}^{n_F} \frac{(x_{di} - x_{ci})^2}{\sigma_i^2 n_F}}$$

Donde,  $x_{di}$  es la velocidad de la curva en frecuencia  $f_i$ ,  $x_{ci}$  es la velocidad de la curva calculada en la frecuencia  $f_i$ ,  $\sigma_i^2$  es la incertidumbre de la muestra de frecuencia y  $n_F$  es el número de frecuencia muestra. Finalmente, la curva de dispersión con sus diferentes modos, a través de un proceso no lineal, se invierte a fin de buscar un perfil teórico que ajuste a dicha curva de dispersión experimental.

A fin de validar los resultados, los modelos de velocidad (Vs) obtenidos mediante este proceso, fueron invertidos a fin de obtener una Función de Transferencia Teórica (FTT) mediante la aplicación del método de Thomson-Haskell para medios estratificados horizontales sujetos a la acción de ondas SH (*Aki y Richards, 1980; Sánchez-Sesma, et al. 2002*), para finalmente sobreponer la FTT con la Función de Transferencia Empírica (FTE) obtenida de las razones espectrales H/V, siendo el grado de correspondencia de la frecuencia fundamental, proporcional a la confiabilidad de los resultados.

La correlación de los resultados geofísicos, es una metodología que permite determinar la relación entre los parámetros físicos encontrados para las diferentes capas del subsuelo. La correlación estratigráfica permite configurar la geometría concava en la que se almacenaron las unidades litoestratigráficas y conocer sus cambios laterales. La validez de la correlación estará en función de la calidad y cantidad de información disponible.

Con la integración de datos de geología, geomorfología, registros geofísicos, patrones sísmicos y el ambiente de depósito, es posible elaborar el modelo geológico con lo que es posible conocer las características sedimentarias del depósito y su geoforma. En este estudio a fin de correlacionar los resultados, se busca patrones, tanto en vertical como en horizontal, de los parámetros físicos y/o formas espectrales obtenidas de las razones



espectrales, permitiendo identificar variaciones laterales en litología, espesores y consistencia.

## **4.2. TIPO Y DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN**

La presente tesis es descriptiva y correlacional, ya que se describen los aspectos Geo-ambientales y su influencia en la respuesta dinámica de los suelos de la ciudad de Ica. Además, permite determinar la relación que existe entre esta respuesta y la geomorfología de la cuenca sedimentaria de Ica. Los resultados de esta investigación permitirán entender la presencia de bajas frecuencias en la respuesta dinámica de los suelos de la ciudad de Ica, como estas se modulan dependiendo de la geomorfología de la cuenca y de la interfase suelo-roca.

## **4.3. UNIDAD DE ANÁLISIS**

La unidad de análisis, corresponde al área urbana del valle de Ica, asentada en el sector bajo de la Cuenca del río Ica. En la zona céntrica de la urbe, se concentran edificaciones de adobe muy antiguas y hacia los extremos, las viviendas se asientan sobre suelos arenosos superficialmente blandos y sueltos.

## **4.4. POBLACIÓN DEL ESTUDIO**

La población del presente estudio son los suelos de la ciudad de Ica y los aspectos geo-ambientales presentes en la región donde se encuentra la ciudad.

#### **4.4.1. Tamaño de la muestra**

La muestra está constituida por los nodos de una grilla con intervalos de 200 km ubicados en la zona urbana. En cada nodo se recolectó registros de vibración ambiental, que mediante su análisis permite evaluar “las características dinámicas del suelo” y su relación con la geomorfología de la cuenca de Ica. Se tomaron un total de 300 datos geofísicos.

#### **4.4.2. Selección de la muestra**

La selección de la muestra es probabilístico, ya que considera el muestreo sistemático definido por la toma de un dato en cada nodo de la grilla (200x200 km), centrada sobre el área urbana.

## **CAPITULO 5: PROCESAMIENTO DE LOS DATOS DE CAMPO**

La adquisición de datos geofísicos fue en superficie y dependiendo de cada método se consideró el espaciado de los sensores para alcanzar menor o mayor profundidad de observación. Generalmente, las mediciones son tomadas considerando datos grillados y/o perfiles de medición, con intervalos regulares. Luego las lecturas obtenidas son procesadas, para cuyos cálculos se aplican las diferentes metodologías, obteniendo perfiles y mapas con la distribución de valores de forma regular.

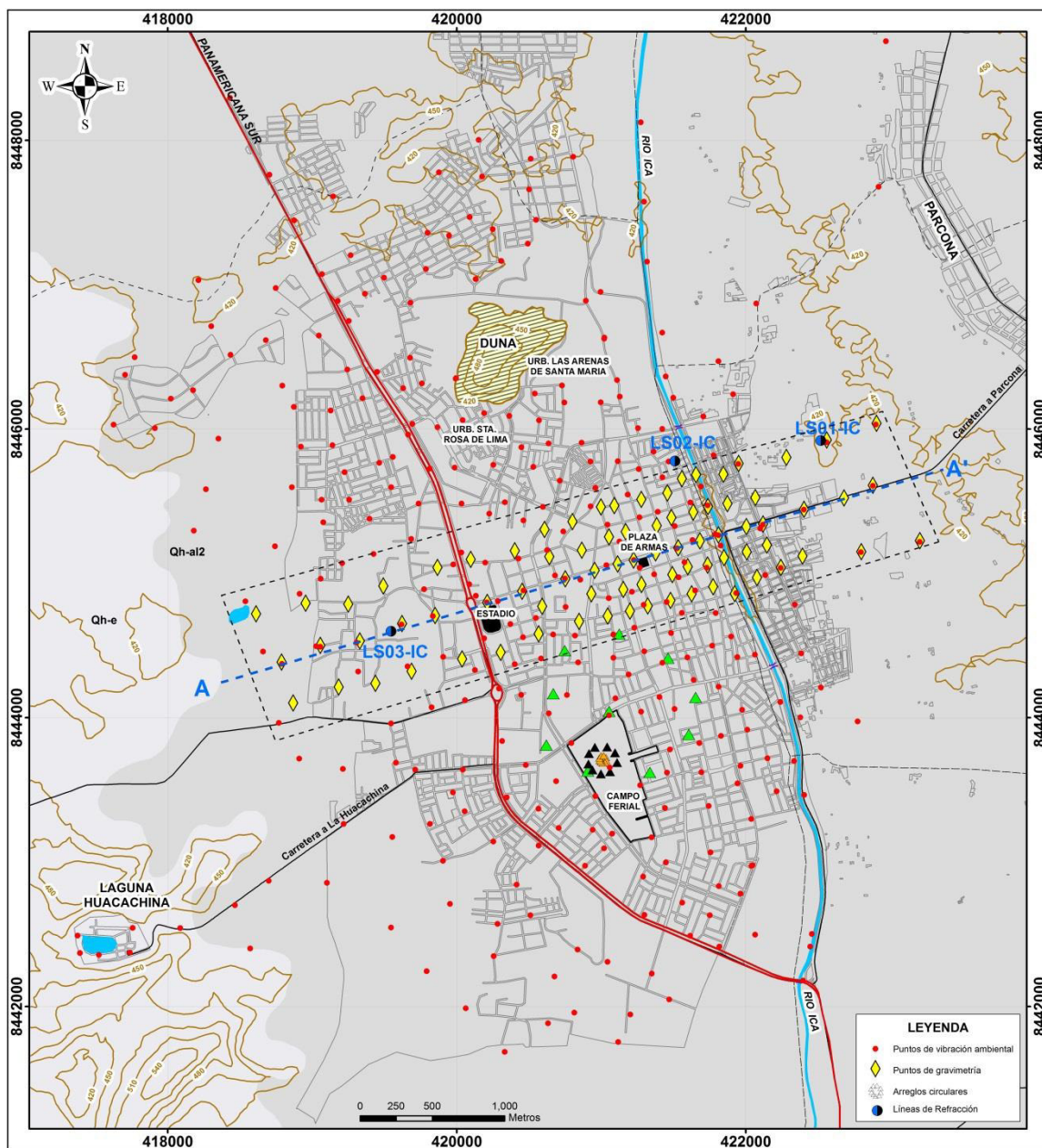
### **5.1 MÉTODO DE RAZONES ESPECTRALES**

#### **5.1.1. Adquisición de datos**

Para el empleo de este método, sobre el plano catastral de la ciudad, se detallaron la ubicación y la cantidad de puntos para la adquisición de registros de vibración ambiental. Previamente, se evaluaron las condiciones geológicas, geomorfológicas y urbanísticas de la zona a intervenir. En la Figura 20 se detalla la ubicación de los 300 puntos donde se adquirieron estos registros de 20 minutos de duración por punto.

El contenido frecuencial de estos registros, se determina mediante su espectro de Fourier para cada una de sus componentes (V, EO, NS), y del cociente de estos espectros en función de la componente vertical (V) se determina la “frecuencia predominante ( $F_0$ ) de respuesta del suelos” en el punto de observación y la sensibilidad a frecuencias secundarias.

En la Figura 21, se presenta el registro de vibración obtenido en el punto IC-21, donde se sombrea en verde, las ventanas de 20 segundos seleccionadas para el análisis espectral. Los resultados evidencian que el suelo responde a 0.4 y 1.7 Hz, con amplificaciones de 6 y 4 veces. El grafico de variación azimutal, revela que la mayor contribución de energía para 0.4 Hz se induce en dirección N-S y para 1.7 Hz, no muestra una dirección predominante.



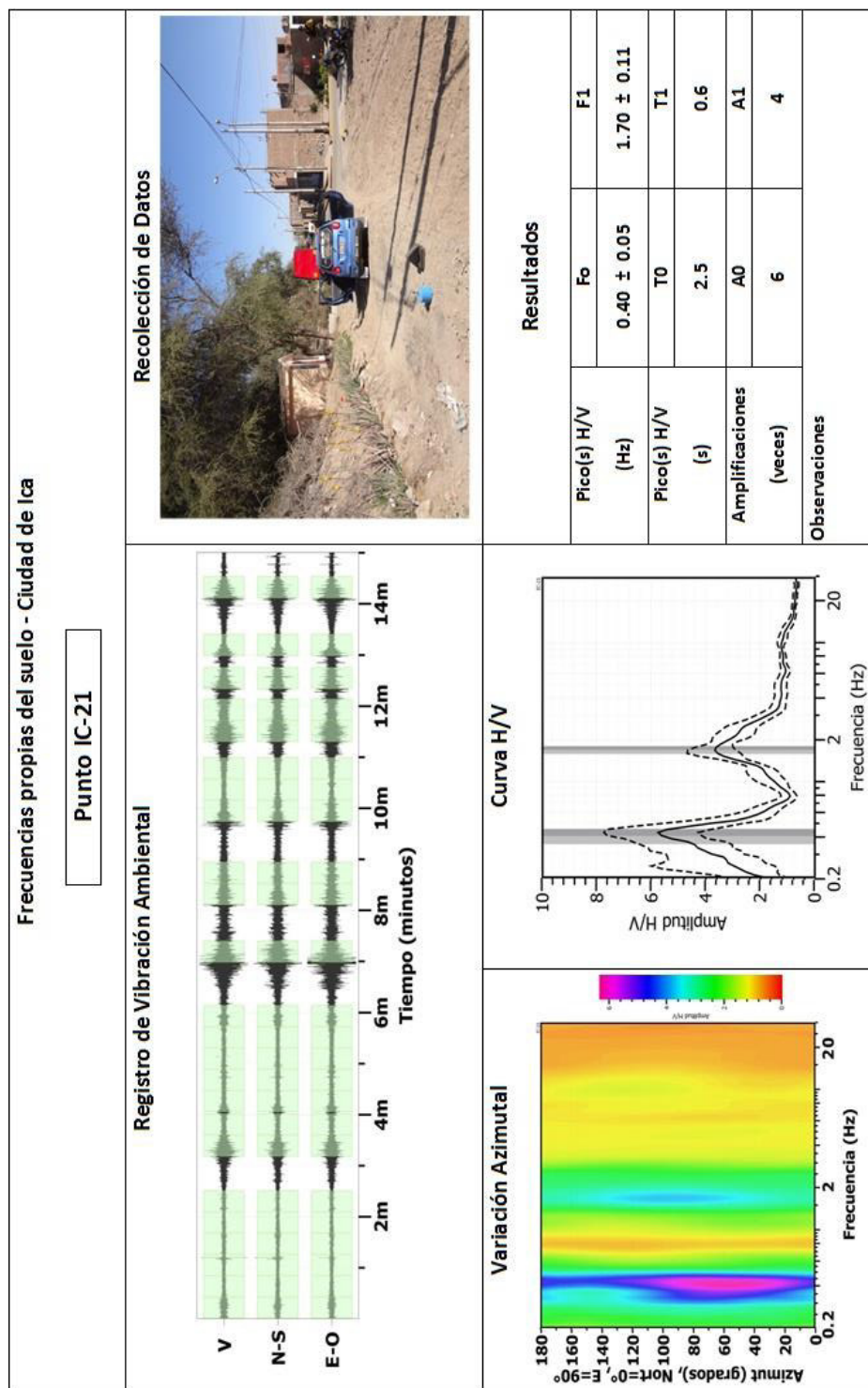
**Figura 20.** Mapa geológico de la ciudad de Ica. Puntos negros, registros de vibración ambiental; rombos en amarillo, registros gravimétricos; triángulos amarillos y verdes, arreglos sísmicos circulares; LS01-LS03, arreglos sísmicos lineales y A-A', indica la orientación del perfil gravimétrico.

### 5.1.2. Procesamiento de la información

El método de razones espectrales, permite conocer la “Frecuencia predominante del suelo ( $F_0$ )” a partir del análisis frecuencial de los registros de vibración ambiental (V.A.). Según Nakamura (2000), las vibraciones (microtremores) se transmiten principalmente en forma de ondas Rayleigh cuyo análisis permite conocer  $F_0$ . Asimismo, permite estimar el factor de amplificación relativa ( $A_r$ ).

$F_0$  y  $A_r$ , permitirán caracterizar el comportamiento dinámico del suelo donde se asienta la urbe de Ica. Para emplear el método de razones espectrales (Figura 21) se considera:

- Del registro de V.A., se selecciona ventanas de 20 segundos de señal estable, tramos con ruido aleatorio son discriminados.*
- Para cada ventana de registros seleccionado, se calcula el espectro de Fourier, para evaluar su contenido frecuencial.*
- El cociente de los espectros respecto a su componente vertical, permite definir  $F_0$ .*
- Para este estudio, se considera un intervalo de interés para  $F_0$  de 0.2-20 Hz, con  $A_r$  de al menos 2 veces (1 es nivel de referencia).*
- El mapa de zonificación se elabora en función de los periodos dominantes ( $T=1/F_0$ )*



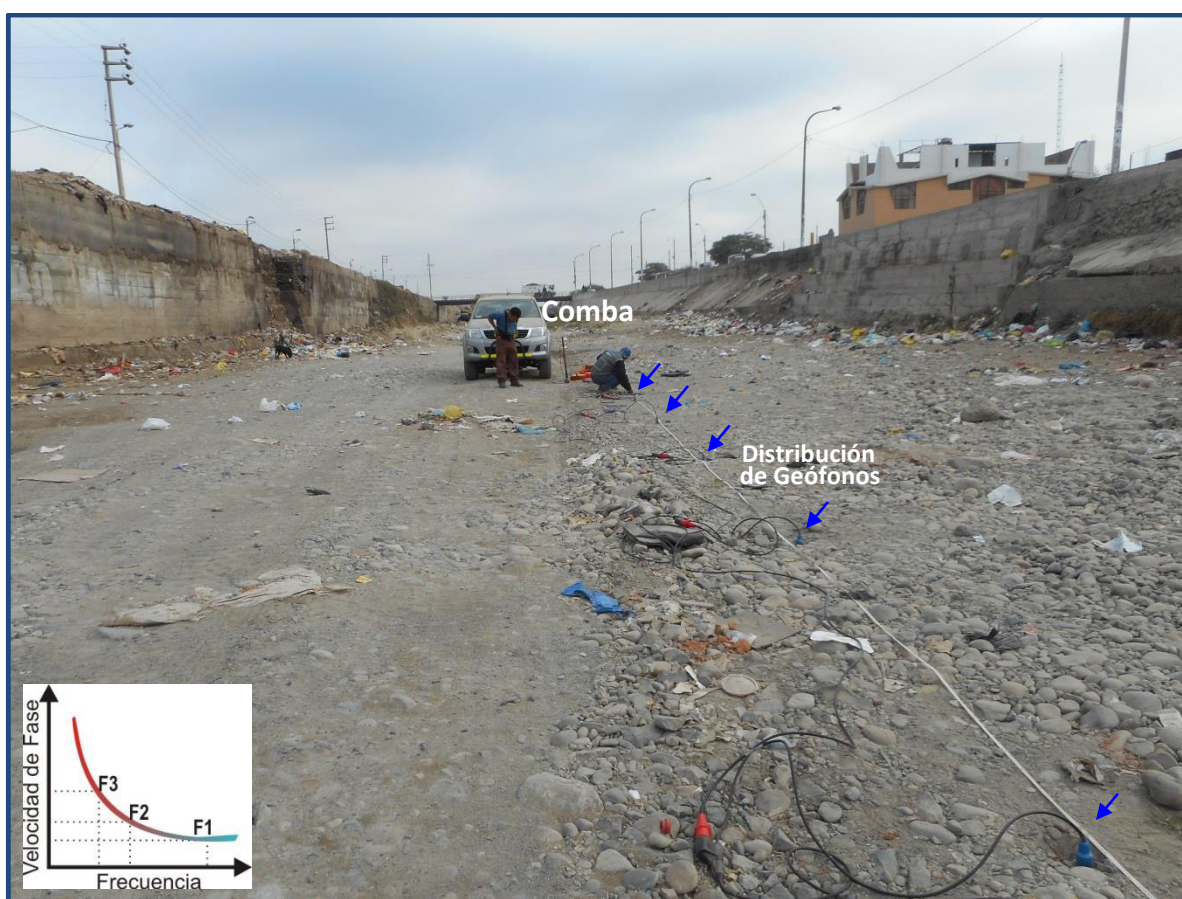
**Figura 21.** Procesamiento de los registros de vibración ambiental. En el extremo superior se define las ventanas utilizadas para el análisis espectral y en el inferior, la curva media de los resultados H/V, con su respectiva grafica de variación azimutal de la energía inducida al medio para cada rango de frecuencia definido.



## 5.2. MÉTODOS SÍSMICOS MASW-MAM

### 5.2.1. Adquisición de datos

La técnica MASW es un método indirecto y determina la estratigrafía del subsuelo bajo un punto; es decir, permite obtener velocidades ( $V_s$ ) y espesores de los estratos que conforman el subsuelo, a partir de la generación y dispersión de las ondas Rayleigh. Estas vibraciones son generadas con una fuente impulsiva y registradas por arreglos lineales de geófonos, tal como muestra la Figura 22.



**Figura 22.** Generación de ondas sísmicas con fuente artificial (comba), del análisis de los registros obtenidos mediante el método de MASW, obtenemos su respectiva curva de dispersión

La adquisición de datos se realiza con un equipo sísmico de uso multipropósito, modelo GEODE de Geometrics, y 24 sensores o geófonos de baja frecuencia (4.5 Hz). Se utilizó un martillo de 20 libras para generar las vibraciones y para dar inicio a la grabación el

dispositivo Hammer Swith, ver Figura 23. La disposición de los equipos y espaciamiento entre geófonos depende de la disponibilidad del espacio y accesibilidad del área de estudio. Se consideró un muestreo de 4000 Hz (0.25 ms) y una longitud de 2 segundos de registro.



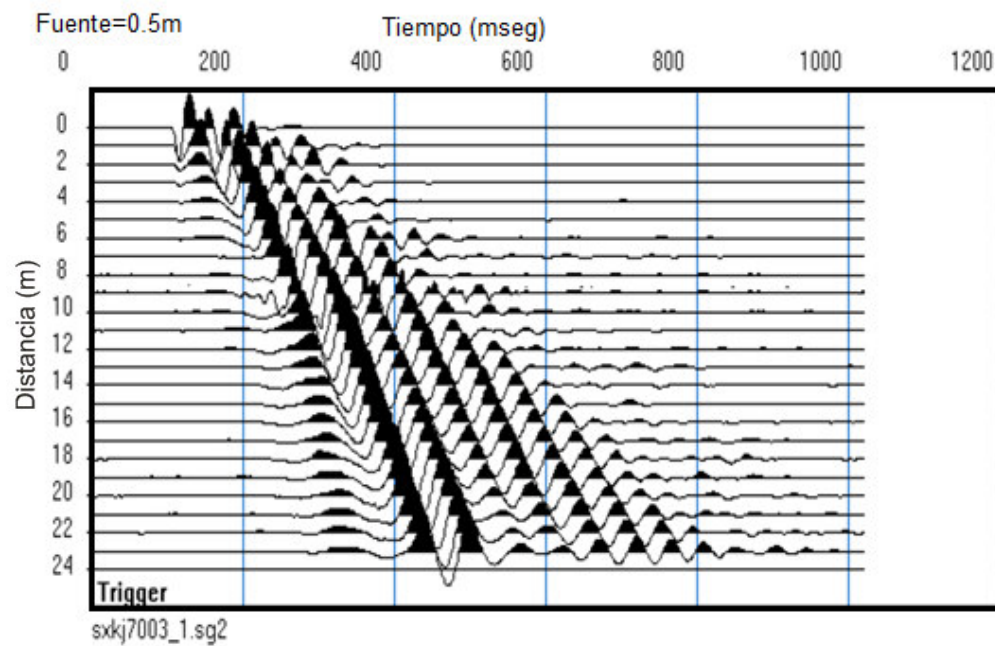
**Figura 23.** Equipos utilizados en la toma de datos de MASW.

Para la adquisición, es necesario determinar la longitud de la línea sísmica ( $D$ ), la cual depende de la profundidad máxima de investigación ( $Z_{max}$ ). Usualmente  $D$  es igual o más grande que  $Z_{max}$ , es decir:  $D = nZ_{max}$ , donde ( $1 \leq n \leq 3$ ). Para fines geotécnicos la profundidad máxima de investigación suele estar a los 30 metros, pero esto puede variar según el sitio, el tipo de suelo, la longitud de arreglo sísmico y el tipo de fuente activa utilizada (Park, 2007).

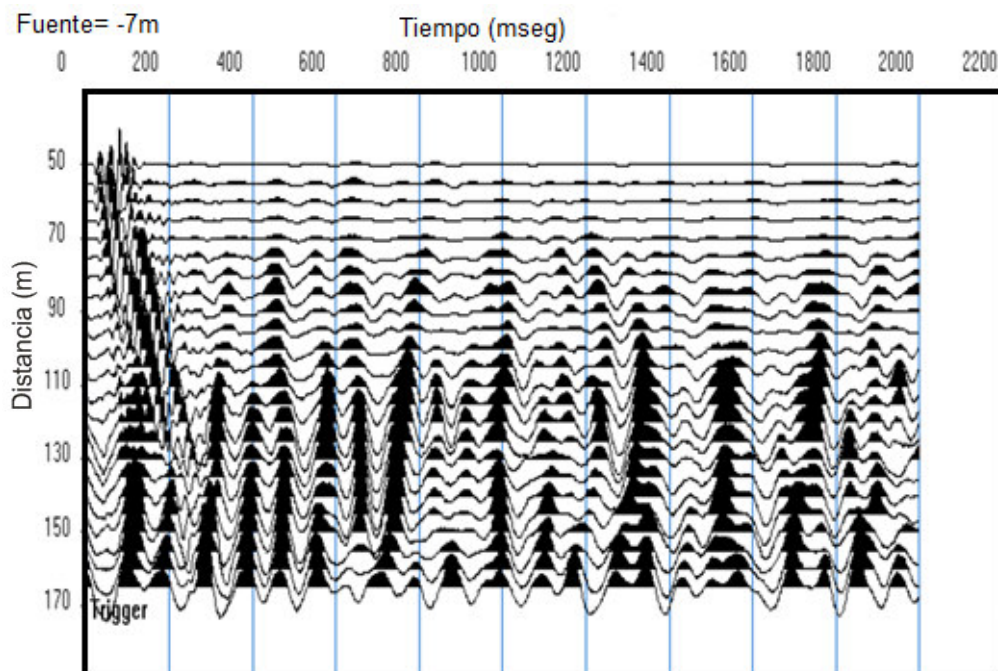
Durante su adquisición se visualiza los datos sísmicos (sismogramas), a fin de verificar la calidad de la data y el nivel de ruido, tal como se observa en la Figura 24. Para mejorar la relación señal/ruido fue necesario realizar apilamientos de señales (en cada punto de disparo se registran varios golpes y es acumulado al anterior), realizando de cuatro a cinco golpes en cada punto "shot". Finalmente, se realiza el procesamiento preliminar para determinar si la profundidad y la velocidad sísmica obtenida tienen sentido geológico y completan la finalidad del estudio.



a.



b.

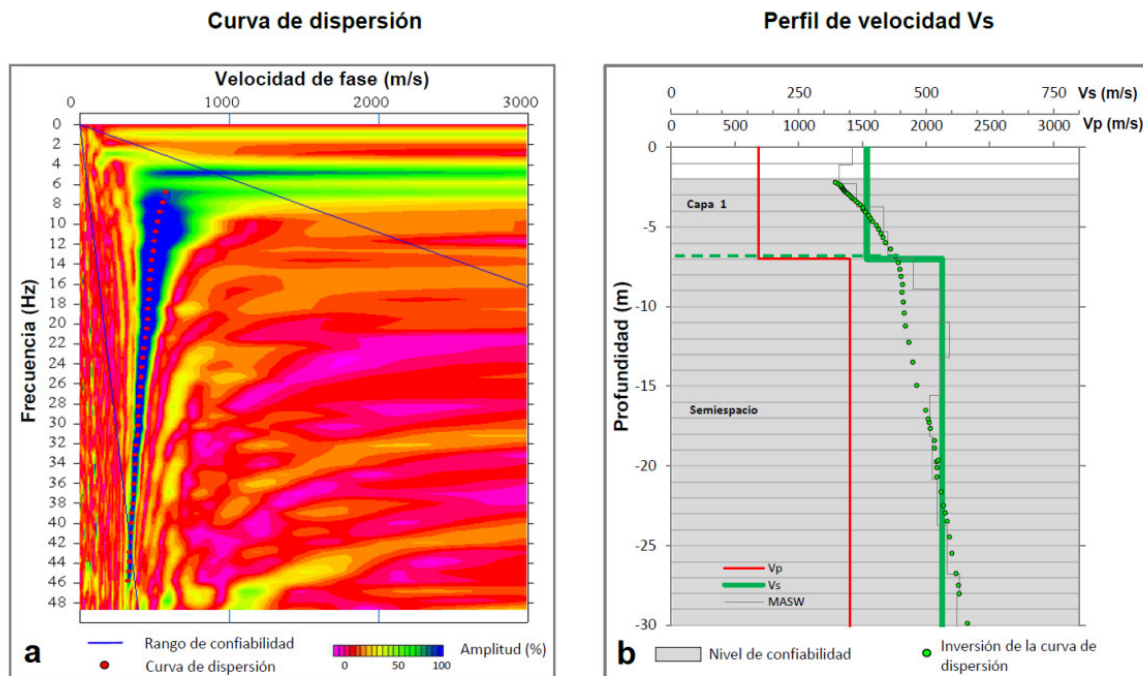


**Figura 24.** Registros sísmicos generados por una fuente externa. a) Con bajo contenido de ruido ambiental; es decir, de alta calidad. b) Con alto contenido de ruido ambiental.

### 5.2.2. Procesamiento de la información

Se utilizó el MASW y fue realizado en el programa de computación SeisImager y consiste en aplicar la transformada rápida de Fourier (FFT) a los registros sísmicos obtenidos para cada punto de disparo (Reynolds, 2011), lo cual permite la transformación de los datos en series de tiempo a frecuencias, obteniendo la “curva de dispersión de las ondas superficiales”. A partir de la inversión de estas curvas, se definen perfiles unidimensionales de Vs para cada disparo. Finalmente, los perfiles invertidos son promediados obteniendo un único perfil unidimensional para cada línea sísmica. Para el proceso de inversión, se considera como parámetros de entrada: la profundidad de 30 metros distribuidos en 15 capas. Seguidamente, podrán ser analizadas proporcionando información útil sobre las características geotécnicas del subsuelo (Park, 2014; Roma, 2010; Socco et al., 2010).

En la Figura 25, se da un caso de los resultados generados del ensayo realizado en el anexo San Isidro. La imagen de la izquierda muestra la curva de dispersión obtenida y de la derecha, el modelo unidimensional de Vs (línea verde) que considera el promedio final de los perfiles obtenidos post inversión, los círculos de color verde representa la curva en función de la frecuencia vs profundidad. Esta curva permite verificar el nivel de confiabilidad o la profundidad mínima y máxima de investigación (área sombreada), en este caso; el perfil presenta una capa sísmica y un semiespacio, donde, el nivel de confiabilidad es de 2 a 30 metros de profundidad.



**Figura 25.** a) Curva de dispersión y b) Perfil unidimensional de Vs obtenida de la inversión de la curva.

Para el análisis e interpretación de los resultados obtenidos en este ítem se considera la clasificación de suelos según la Norma E.030, que considera la velocidad promedio de propagación de las ondas de corte para los 30 metros superiores ( $V_{s30}$ ). En este caso, las velocidades de los perfiles de suelo S1 y S2 se subdividen, según la Tabla 3, para un mayor detalle de la distribución de este parámetro. Asimismo, cada rango de velocidad es representado con colores, y son mostrados en la Tabla 4.

Finalmente, se realiza la correlación de las capas sísmicas obtenidas con la geología de la zona de estudio; asimismo, la correlación de algunos sectores con el contenido de humedad o nivel freático, parámetros que influyen en la variación de “velocidad de ondas”  $V_s$ .

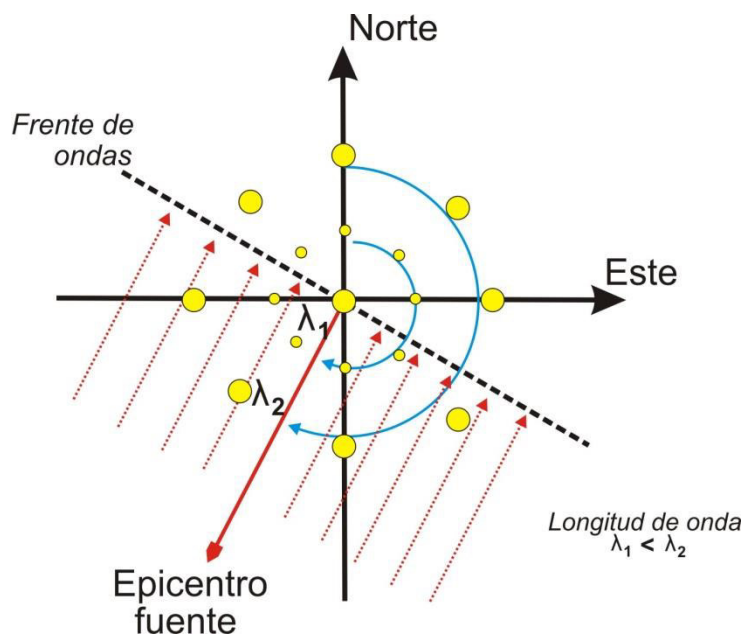
**Tabla 4.** Perfiles de suelo ( $V_s$ ) correspondientes a la tipología del área de estudio.

Clasificación de los perfiles de Suelo			
N°	$V_s$	Norma E030	Descripción
1	< 180 m/s	Suelo blando	Suelo blando
2	180 m/s a 300 m/s	Suelo rígido	Suelo moderadamente rígido
3	400 m/s a 600 m/s		Suelo rígido
4	600 m/s a 800 m/s	Roca o suelo muy rígido	Suelo muy rígido o roca blanda
5	800 m/s a 1500 m/s		Roca moderadamente dura
6	> 1500 m/s	Roca dura	Roca dura

### 5.3. MÉTODO SÍSMICO F-K

#### 5.3.1. Adquisición de datos

La técnica F-K es un método indirecto y permite determinar la estratigrafía del subsuelo, a partir de registros de vibraciones ambientales obtenidos considerando arreglos circulares de sensores sísmicos, tal como muestra la Figura 26. La señal grabada en cada sensor sísmico (geófonos) está formada por la combinación de frentes de ondas que cruzan el arreglo, las señales reducen su velocidad (se retrasan) de acuerdo a la geometría del arreglo y la dirección de incidencia de los tiempos de llegada coinciden en que el frente de onda llega a todas las estaciones, por lo que pueden combinarse entre ellas.



**Figura 26.** Frente de ondas planas que atraviesan el arreglo circular de diferentes radios. Fuente: modificado de Ohrnberger et al. (2012).

A partir de definir el rango de confiabilidad de los diferentes arreglos, en este estudio se consideraron arreglos con radios de 10, 30, 100 y 400 m. (Figura 27), obteniendo registros de vibración ambiental para periodos de 30 minutos a 4 horas, dependiendo de diámetro del arreglo. Se ha utilizado 10 sensores Guralp de tres canales con su respectivo registrador Reftek de 24 bits. El punto central se ubicó en el Campo Ferial de Ica. Los rangos de confiabilidad para los radios de  $r=10$  metros es de 10-15Hz;  $r=30$  metros de 5-8Hz;  $r=100$  metros, de 2.5-4.5Hz y  $r=400$  metros de 0.8-1.5Hz.



a)



b)



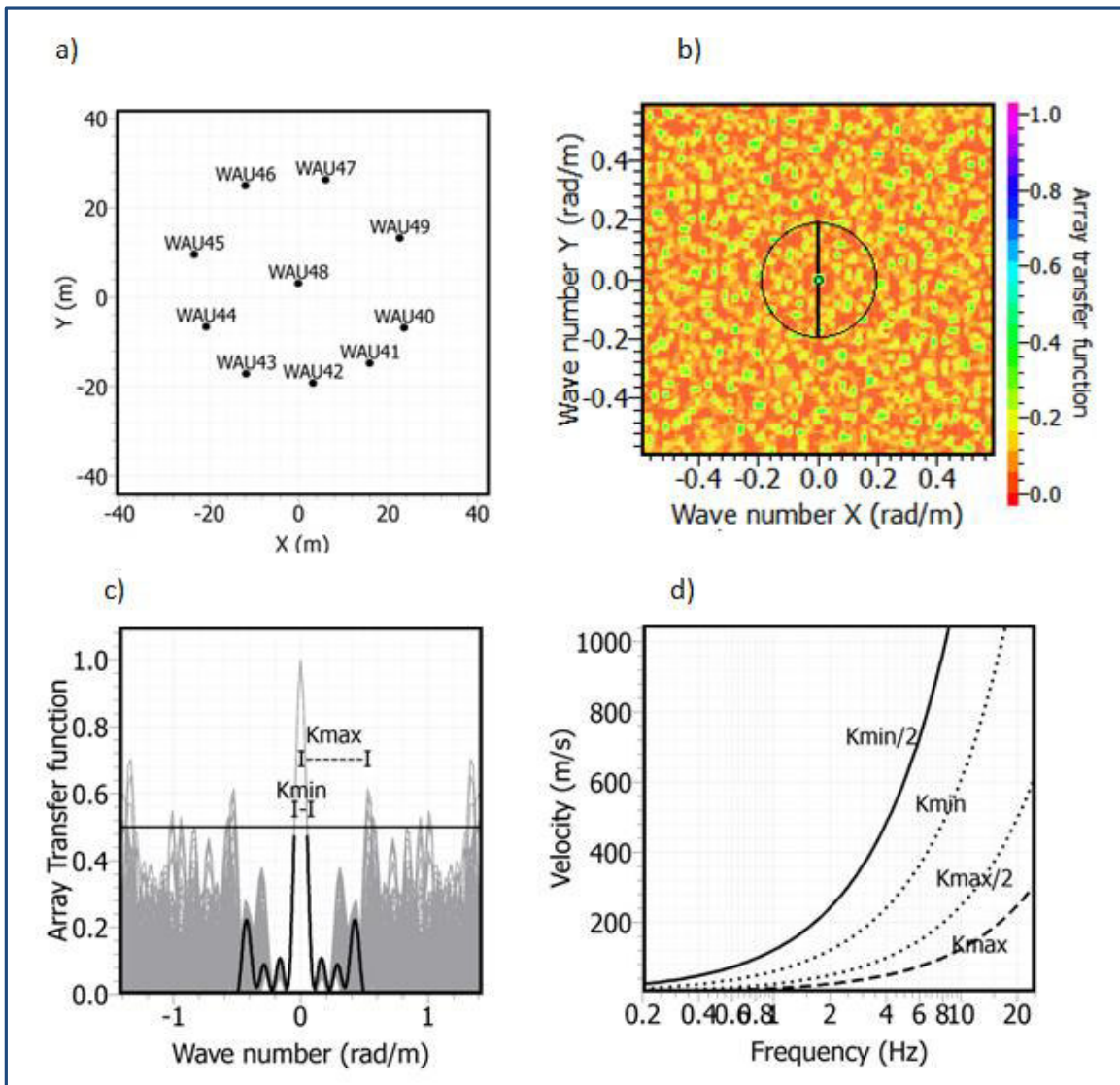
**Figura 27.** a) Sincronización de los 10 sensores sísmicos Guralp utilizados en este estudio, con sus respectivos registradores Reftek de 24 bits. b) Disposición de los equipos considerando el arreglo sísmico circular, realizado en el Campo Ferial de la ciudad de Ica.

### 5.3.2. Procesamiento de la información

Para el procesamiento de los registros, se seleccionaron y analizaron ventanas de tiempo de 25 segundos de registro, por separado. Una transformada de Fourier permite analizar los datos en el dominio F-K, por lo que un espectro de energía puede construirse de acuerdo con las formas de onda estudiadas. Con base en el reconocimiento de los valores pico de este espectro, donde se puede identificar concentraciones de energía, es posible identificar una curva de dispersión, mediante el ajuste normal de los resultados obtenidos en las diferentes ventanas de tiempo, de acuerdo a la composición de frecuencia, velocidad de fase y dirección de incidencia.

Para esta técnica, el parámetro de mayor sensibilidad están asociados al rango de confiabilidad (Wathelet, 2005a) de cada arreglo sísmico circular (Figura 28a) ya que dependen de la distancia ( $D$ ), longitud de onda ( $\lambda$ ) y número de ondas ( $K$ ). Donde  $K_{min}$  y  $K_{max}$ , dado en un espacio bidimensional  $K_x$  y  $K_y$  (Figura 28b,c), definen la mayor y menor contribución de energía al propagarse las ondas. En la Figura 28d, las curvas discontinuas sectorizan las curvas de dispersión y delimitando las zonas de mayor resolución para la curva de dispersión, identificándose zonas de baja energía (valores menores frecuencia) y de aliasing con varios picos de energía (valores mayores de frecuencia). Este último, está asociado al espaciamiento mínimo entre sensores.

En general, el enfoque pasivo F-K proporciona curvas de dispersión confiables que varían entre 2 y 25 Hz, dependiendo de la rigidez del suelo y su longitud de onda que permite explorar a mayores profundidades.



**Figura 28.** a) Arreglo circular de 30 metros de radio; b) Muestra la función de respuesta con un pico global en el centro y otros picos locales, que representan las contribuciones de la energía superior e inferior ( $K_{min}$ , y  $K_{max}$ ), dados en un espacio bidimensional  $K_x$  y  $K_y$ ; c) Muestra la función de respuesta para diferentes acimuts (direcciones de incidencia del frente de onda), el pico central denota dos frentes de onda ( $K_{min}$ , y  $K_{max}$ ); d) Las dimensiones y geometría del arreglo definen las curvas de resolución (línea discontinua, delimitando las áreas de mayor resolución).



## 5.4. MÉTODO GRAVIMÉTRICO

### 5.4.1. Adquisición de datos

En el área urbana de Ica, se adquieren 80 datos gravimétricos distribuidos en 5 líneas paralelas: 3 líneas de 4.5 kilómetros de longitud y 2 de 1.5 kilómetros, todas en dirección SO - NE, y separadas entre sí, por una distancia de 300 metros en promedio (Figura 20). La distancia entre cada punto de medición es de 200 metros. Se utilizó un gravímetro “La Coste & Romberg de  $\pm 0,01$  mGal de precisión”. Los valores fueron corregidos al valor absoluto, considerado como referencia el valor obtenido en el túnel del río Grande (978215.134 mGal), ubicado al sur de la ciudad de Ica. En cada punto se determinó la altura elipsoidal utilizando una estación total NIKON DMT-322 en base a la WGS84 (World Geodetic System 1984)

### 5.4.2. Procesamiento de la información

Los datos gravimétricos obtenidos en campo, contienen el efecto de todas las masas de su entorno (masas topográficas), a fin de obtener la información del basamento rocoso de la cuenca de Ica, se compara el valor de gravedad medido ( $g_{obs}$ ) y el teórico ( $g_{Teórico}$ ) reducido al nivel medio del mar; a través, de la corrección por Aire Libre. Para esta corrección se utilizó modelos de elevación regional (Shuttle Radar Topographic Mission, SRTM) y local obtenido en campo considerando una grilla de resolución de 50 x 50 metros.

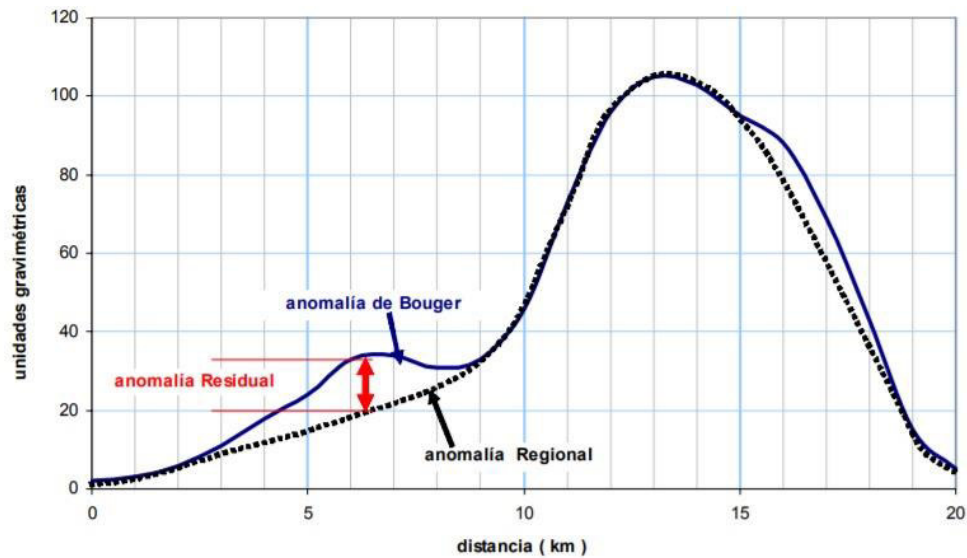
Al considerar que las anomalías regionales denotan los valores de  $g_{obs}$  asociada a fuentes profundas y las anomalías residuales a fuentes superficiales, es necesario eliminar las anomalías regionales del mapa de Bouguer para evidenciar los efectos de corta a mediana longitud de onda. Siendo el interés principal delimitar interfaces o cuerpos a niveles superficiales (Figura 29).

Para la corrección de Bouguer se utilizó el software Oasis Montaj de Geosoft y una densidad media para las rocas de  $2,5 \text{ g/cm}^3$  (Hinze, 2005) y para la corrección topográfica se considera la metodología propuesta por Kane (1962) y Nagy (1966), que por medio de una operación de muestreo, se asigna el valor de corrección a cada punto gravimétrico. Finalmente, se realiza la interpolación triangular de los valores de anomalía de Bouguer a fin de obtener el mapa residual de Bouguer.

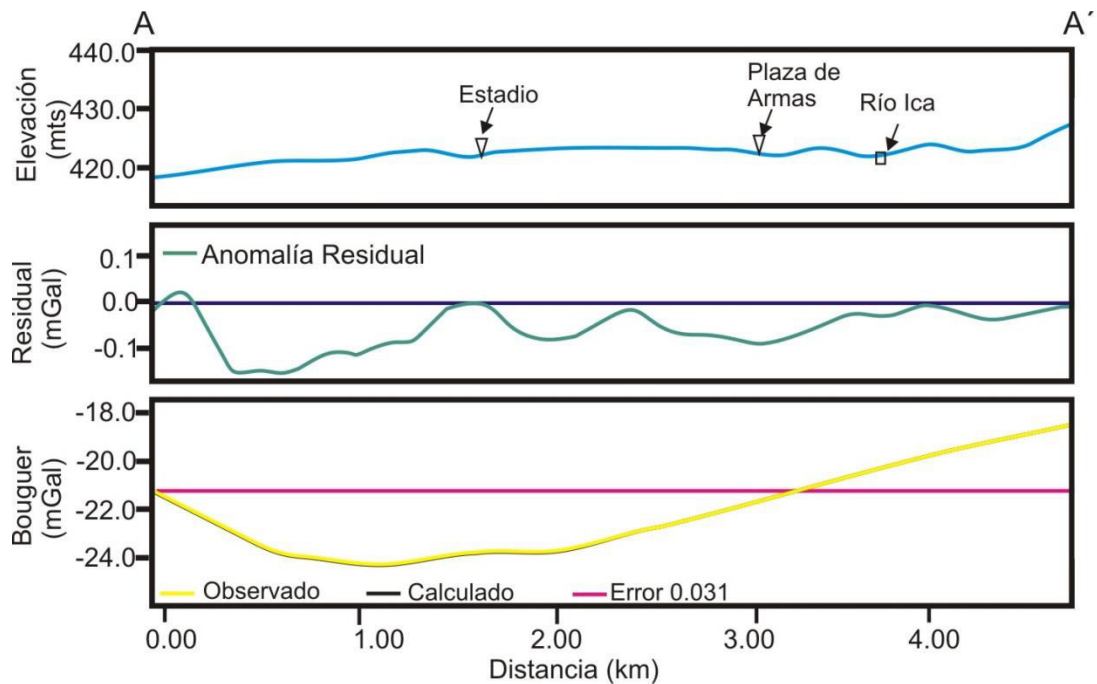
A fin de estimar la profundidad de la anomalía residual de Bouguer, se calcula el “espectro de potencia (P) de la anomalía de Bouguer en función del número de onda” (Croce, et. al., 2009). Según este espectro, los valores en frecuencia se distribuyen siguiendo tres tendencias, donde los valores bajos presentan fuerte pendiente (ondas con gran longitud), corresponde al término regional, los valores medios, presenta una pendiente suave (cortas longitudes de ondas) y los valores altos los valores siguen una tendencia casi horizontal (Grupta y Ramani 1980).

Por lo tanto, para estimar la profundidad de las anomalías se utiliza el método de análisis espectral propuesto por *Spector y Grant (1970)*, que permite transformar la grilla de la anomalía de Bouguer del dominio de espacio, al dominio de frecuencias. Los valores correspondientes a cada pendiente del espectro, dividido entre  $4\pi$ , permite conocer la profundidad promedio del centro de masa de cada anomalía.

a)



b)



**Figura 29.** Arriba: Esquema sobre la diferencia de las anomalías regionales y las de Bouguer (gravedad) observadas, a fin de obtener la anomalía residual de Bouguer (Álvarez 2003). Abajo: Cortes de elevación topográfica, anomalías residuales y la sobre posición de las curvas de las anomalías de Bouguer observada y la calculada.

## CAPITULO 6: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

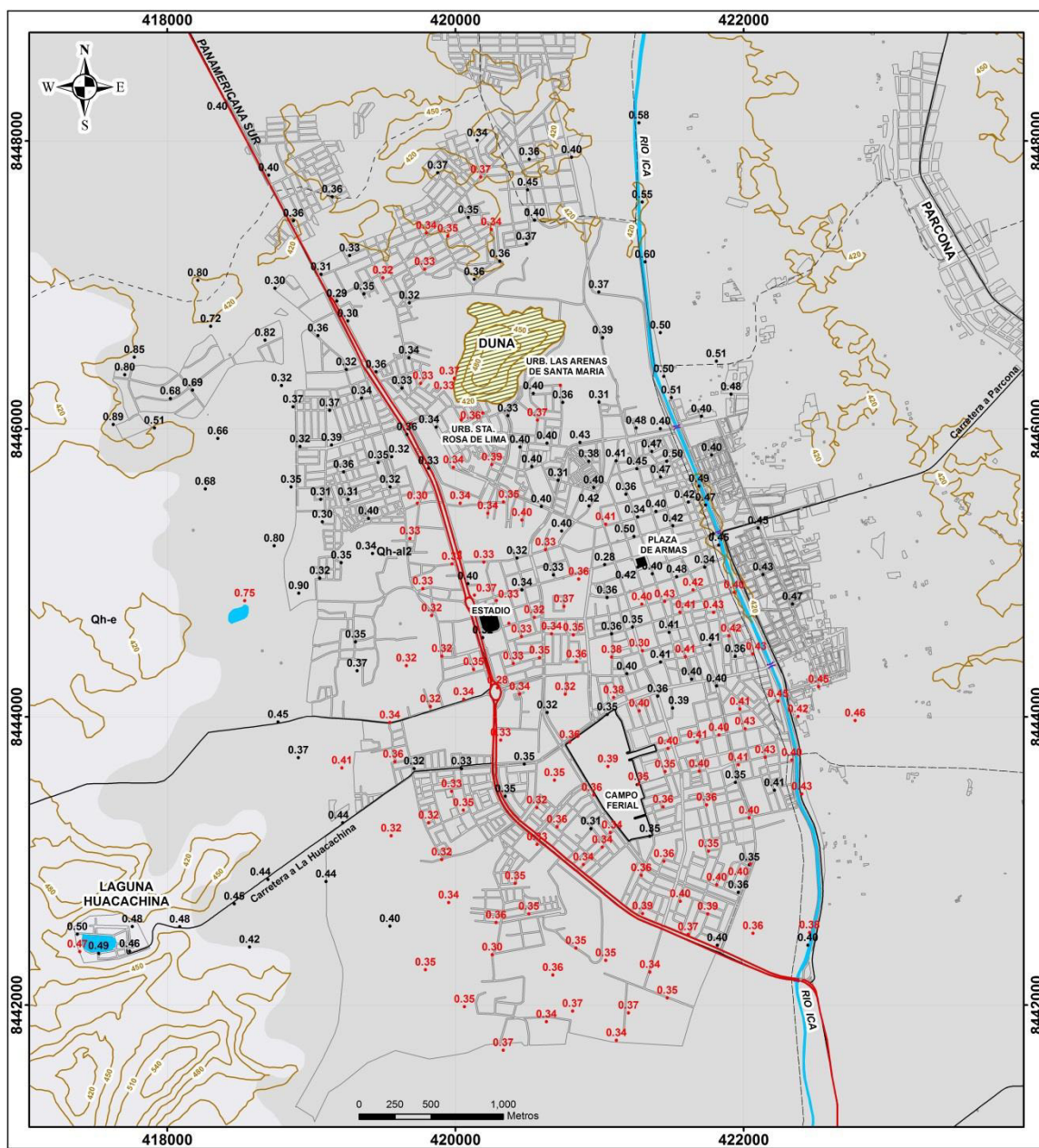
El procesamiento y análisis de los datos geofísicos, utilizando las diferentes metodologías, permitieron conocer y estimar diferentes parámetros dinámicos y físicos que caracterizan el subsuelo por debajo de la ciudad de Ica. A partir de la correlación de estos resultados se determinará como se comportaran los suelos al interactuar con las ondas elásticas generadas por sismos. Finalmente, se obtendrá la zonificación sísmica de los suelos de la ciudad Ica y un modelado 3D de la estructura rocosa sobre la cual se depositan los estratos donde se emplaza la ciudad de Ica.

### 6.1. CARACTERÍSTICAS DINÁMICAS DEL SUELO

#### 6.1.1. Distribución de las frecuencias predominantes del suelo

**Frecuencias Predominantes:** Los picos de frecuencias preponderantes identificados en las gráficas de H/V, para la ciudad de Ica (Figura 30), muestran la existencia de dos rangos de frecuencias,  $F_0$  ( $F < 1.0\text{Hz}$ ) y  $F_1$  ( $F \geq 1.0\text{Hz}$ ) con amplificaciones que varían entre 2 y 6 veces según su ubicación. Para  $F_0$ , predominan valores entre 0.4 y 0.8 Hz con amplificaciones relativas de hasta 5 veces. Los valores para  $F_1$ , entre 1.0 y 3.0 Hz, con amplificaciones de hasta 6 veces. A continuación, se describe la distribución espacial de  $F_0$  y  $F_1$  en el área urbana de Ica:

- **Frecuencias  $F_0$  ( $F < 1.0\text{Hz}$ ):** en este rango de frecuencias sobresalen valores entre 0.3 y 0.5 Hz, y de acuerdo a su distribución espacial, los valores de 0.3 Hz se concentran en el sector Oeste, a lo largo de la Carretera Panamericana Sur y valores predominantes de 0.4 Hz se concentran en la zona cercado de Ica, siguen una tendencia paralela al río Ica. Asimismo, hacia el extremo Oeste, en la periferia del área urbana predominan valores de 0.4 a 0.5 Hz. Específicamente en la Laguna Huacachina, se obtienen valores de 0.45 Hz. Hacia el extremo NO del área de estudio los valores tienden a incrementarse alcanzando máximos de 0.8 Hz.



**Figura 30.** Mapa con la distribución de valores de frecuencias  $F_0$  ( $F < 1.0\text{Hz}$ ). Los números en rojo representan a puntos con amplificaciones mayores e iguales a 4 veces.

● *Frecuencias F1 ( $F \geq 1.0\text{Hz}$ ):* en este rango de frecuencias sobresalen valores de entre 1.0 y 3.0 Hz (Figura 31), y de acuerdo a su distribución espacial, ellos se sectorizan:

*1) Valores entre 1.5 y  $<2.0$  Hz, se distribuyen a lo largo de Panamericana sur, entre la duna y el campo ferial de Ica, para luego continuar con esta tendencia paralela al río Ica, considerando que la carretera Panamericana cambia su orientación.*

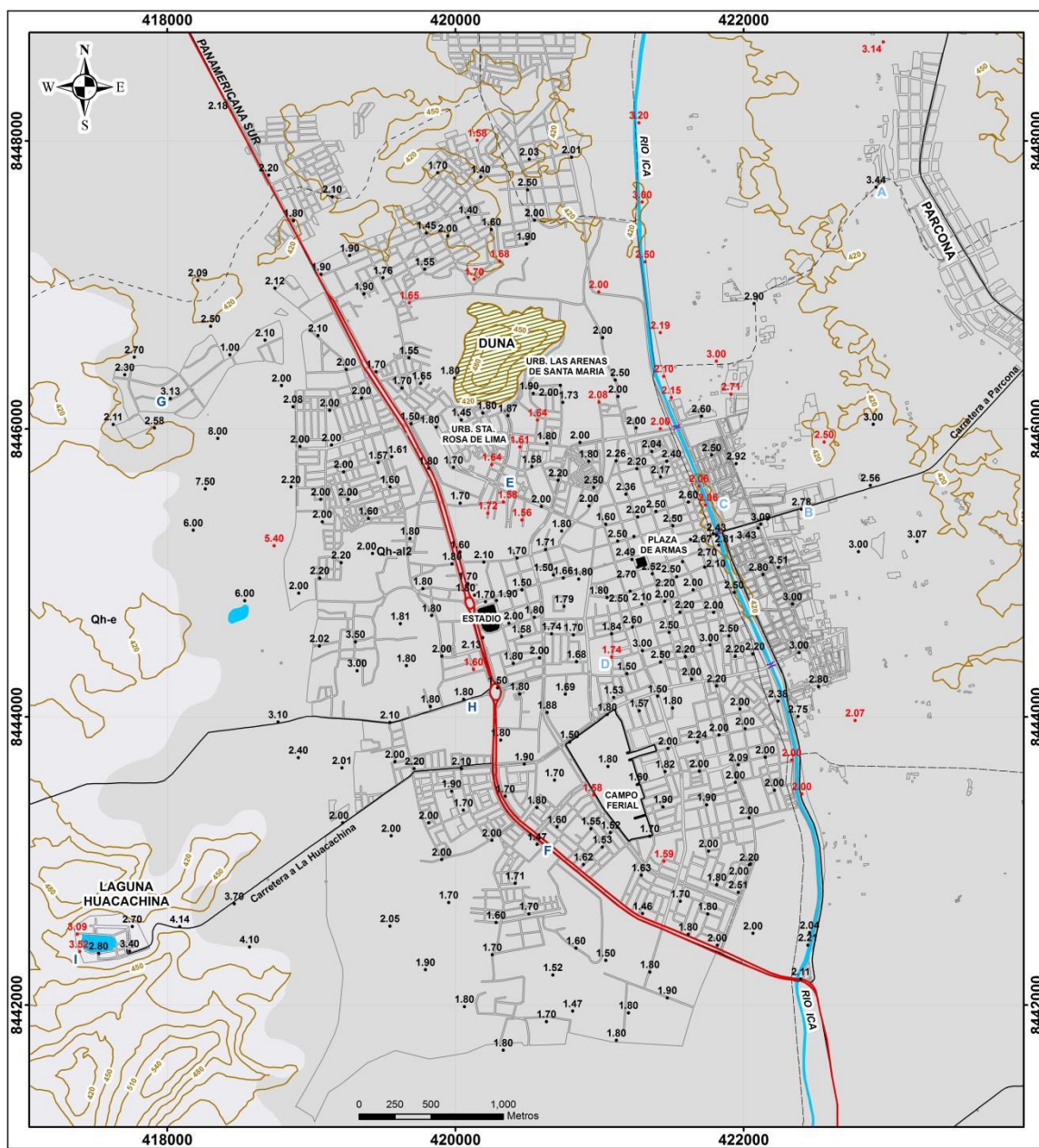
*2) Valores entre 2.0 y 2.7 Hz, en el cercado de la ciudad hasta el cauce del río Ica;*

*3) Valores de entre 2.5 y 3.5 Hz, hacia la margen izquierda del río Ica;*

*4) Valores de 2.0 a 5.0 Hz, hacia el extremo Oeste del área urbana de Ica y/o zona periférica. En la Laguna de la Huacachina, los valores fluctúan de entre 2.7 y 4.0 Hz.*

Asimismo, hacia los extremos Norte de la Urb. Santa Rosa y hacia el Sur del campo ferial, la distribución y tendencia de los valores siguen los patrones observados en la zona céntrica de la ciudad.





**Figura 31.** Mapa con la distribución de valores de frecuencias  $F1$  ( $F \geq 1.0 \text{ Hz}$ ). Los números de mayor tamaño representan a valores mayores e iguales a  $2.0 \text{ Hz}$  y en rojo, aquellos que presentan amplificaciones mayores e iguales a 4 veces.

### 6.1.2. Amplificaciones máximas relativas ( $A_r$ )

En general, de acuerdo a la distribución de  $F_0$  y  $F_1$ , en los puntos ubicados próximos a la Urb. Santa Rosa de Lima (extremo norte), al río de Ica (extremo Este) y a La Laguna de la Huacachina (extremo SO), destacan valores de frecuencias en el rango de  $F_0$ : 0.35, 0.4 y 0.48Hz con  $A_r$  de 5, 3 y 3.5 veces y para  $F_1$ , los valores son de 1.8, 2.6 y 3.0Hz con  $A_r$  de 4, 2.5 y 3 veces. Los valores más bajos de  $F_0$  y  $F_1$  se concentran entre la Duna y el Centro Ferial de Ica y tienden a incrementarse hacia los sectores Este y Oeste de la ciudad.

A fin de evaluar la forma y amplitud de las curvas de razones espectrales, en la Figura 32 se muestra 4 ejemplos de curvas representativas, ordenadas según su ubicación. En A, ubicada en la zona céntrica, predomina  $F_0$  (0.4 Hz) sobre  $F_1$  (2.0Hz). En B, ubicado próximo al río Ica,  $F_0$  y  $F_1$  responden de manera similar; mientras que, en C y D hacia la margen izquierda del río Ica se tiene el predominio de  $F_1$  con valores entre 2.0 a 4.0Hz

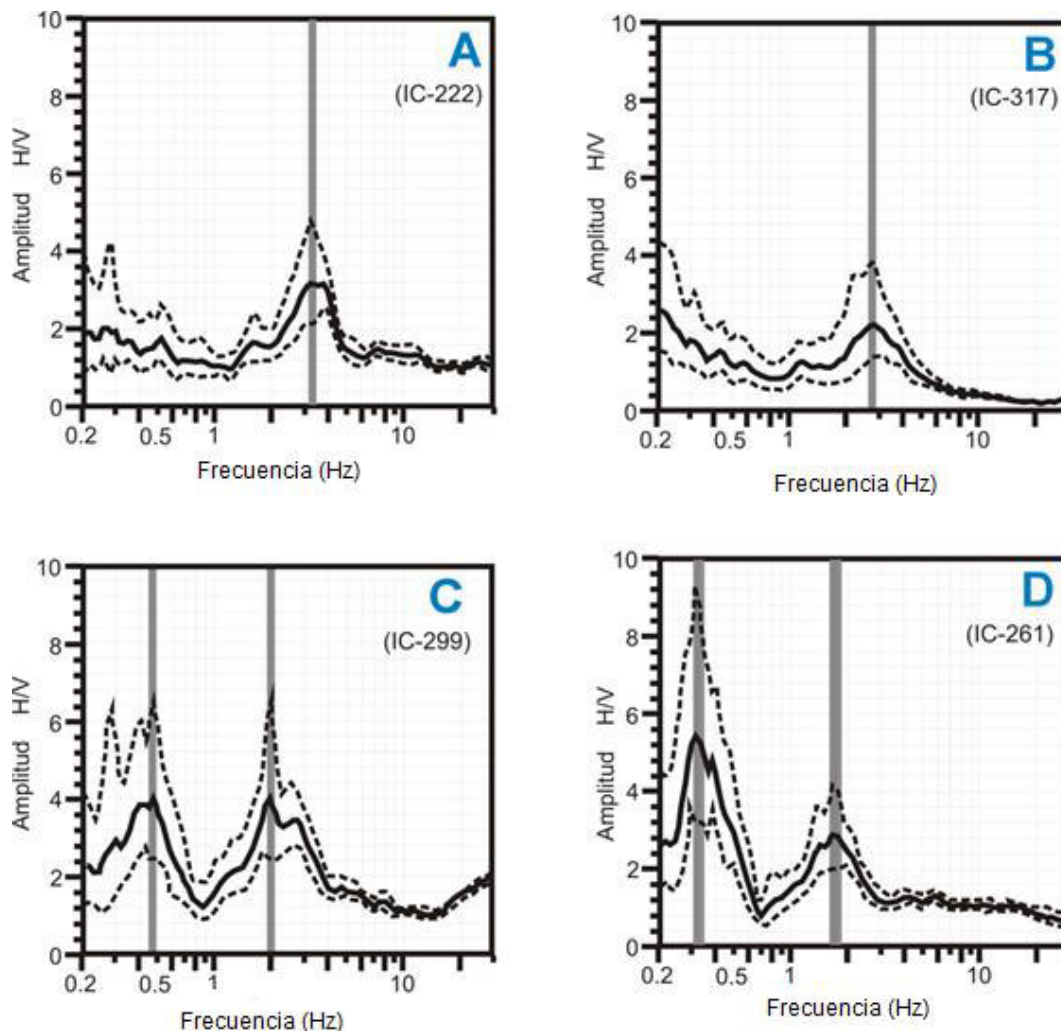
Se concluye que los suelos donde se emplaza la ciudad de Ica responden:

- 1) *A dos rangos de frecuencias predominantes,  $F_0$  y  $F_1$ ,*
- 2) *Asimismo, conforme se tiende hacia el río Ica,  $F_0$  desaparece y  $F_1$  tiende a mayores valores,*
- 3)  *$F_0$ , presenta amplificaciones relativas de hasta 6 veces, en los puntos ubicados entre la Duna de Santa Rosa y el Campo Ferial de Ica.*
- 4)  *$F_1$ , presenta máximas amplificaciones relativas de hasta 3 veces, en el sector sur del área de estudio (Universidad de Ica), en sectores camino a Parcona y en la Laguna La Huacachina.*

En general, se observa que la distribución de valores de frecuencias observadas en este estudio, son coherentes con la geomorfología de la zona de estudio. Los valores muy bajos a bajos, sugirieren la presencia de estratos sedimentarios de gran espesor con dos interfaces bien definidas; sin embargo, la distribución de los factores de amplificaciones



para  $F_0$  y  $F_1$ , no presenta correspondencia con la geomorfología superficial de la zona, considerando que la ciudad de Ica presenta un topografía casi plana.



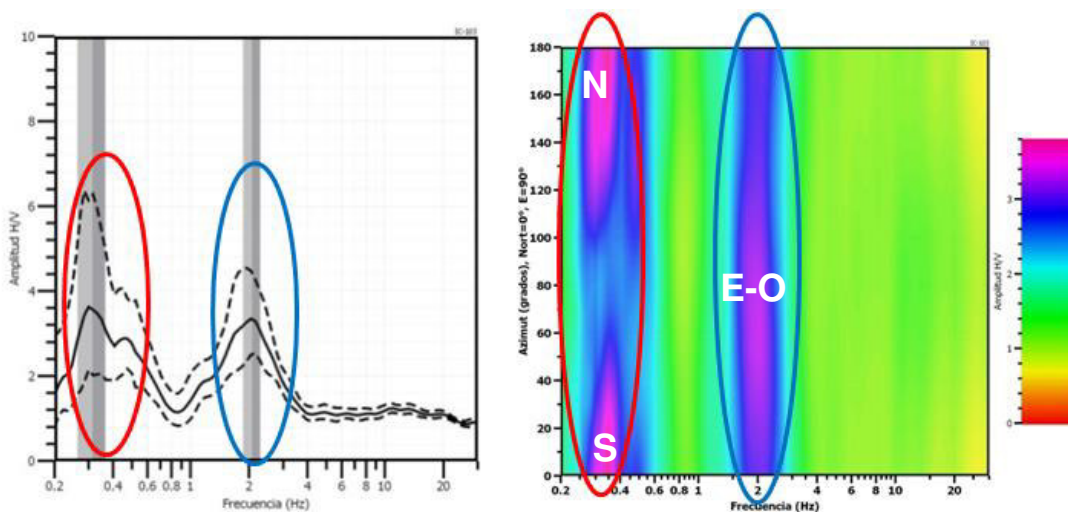
**Figura 32.** Curvas características de cocientes espectrales, obtenidas en puntos ubicados hacia el extremo derecho (C,D) e izquierda (A, B) del río Ica (Figura 31). En cada gráfico la línea continua representa la curva promedio de las razones espectrales obtenidas para las diferentes ventanas seleccionadas y las interlineadas su rango de dispersión. Las barras grises, definen las frecuencias que sobresalen.

### 6.1.3. Distribución Frecuencia-Acimut de la energía ambiental inducida al subsuelo.

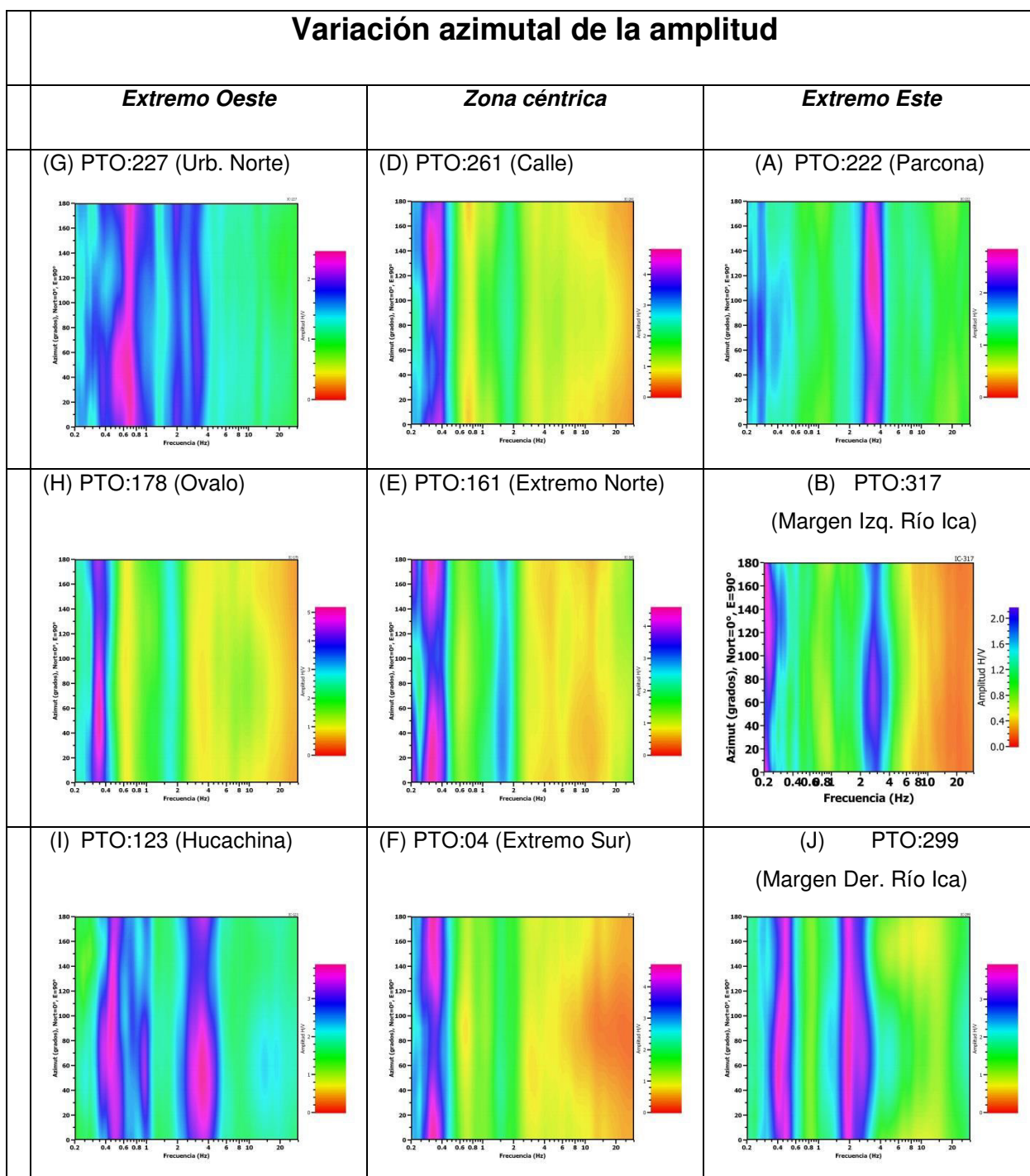
Mediante la representación gráfica de las razones espectrales H/V en el plano horizontal, se estima la dirección de la mayor contribución de la energía en función de su azimuth para diferentes rangos de frecuencia; es decir, como se distribuye espacialmente, una función azimuthal desde los registros de vibración ambiental en 3D a lo ancho de la cuenca de Ica.

Los gráficos se presentan en frecuencia-azimut y los resultados se muestran en dos direcciones NS y EO, entre 0° y 180° (Figura 33 y 34).

De los resultados obtenidos, para el punto IC-103 (Figura 33) sobresalen dos picos de frecuencia  $F_0$ : 0.38 Hz y  $F_1$ : 2.0 Hz. Acimutalmente  $F_0$ , presentan mayor contribución de energía en dirección Norte-Sur, coincidiendo con el eje mayor de la ciudad de Ica (paralelo al río Ica); a diferencia de  $F_1$ , que la mayor contribución de la energía es en la dirección Este – Oeste (perpendicular al río Ica).



**Figura 33.** Extremo izquierdo: curva promedio de las razones espectrales de registros de vibración ambiental, obtenidas para el punto IC-103. Extremo derecho: Gráfico frecuencia – acimut. En el Eje vertical, 0° y 180° corresponde a la dirección NS y 90° corresponde a la dirección EO.



**Figura 34.** Ejemplo de gráficos frecuencia – acimut, obtenidos para puntos ubicados en el centro del área urbana de Ica, y hacia sus extremos Este y Oeste. Para la ubicación de estos puntos ver la Figura 31.

En la Figura 34, se obtienen gráficos frecuencia-azimut para diferentes puntos ubicados en el centro del área urbana de Ica y hacia sus extremos Este y Oeste. Se observa claramente, que en la zona céntrica la mayor contribución de la energía se presenta en dirección Norte – Sur (puntos: D, E y F) para frecuencias de 0.3 y 0.4 Hz; a diferencia de lo observado en los puntos obtenidos hacia el extremo izquierdo del río Ica, que hay un predominio Este-Oeste a frecuencias de entre 2 a 3 Hz (puntos: A y B). Además, en el punto C, próximo al río Ica, se observa que hay influencia también a 2.0 Hz y hacia el extremo Oeste, hacia los puntos ubicados al NE (G) y en La Huacachina (I), sobresalen dos rangos de frecuencia los cuales tienden a valores mayores para ambas casos y la contribución de la energía no tienen una dirección preferente.

Estos resultados sugieren que la ciudad de Ica, al ser parte de la cuenca baja del río Ica y al estar delimitada hacia los extremos Este y Oeste por cerros y lomas, canalizaría la energía inducida a la estructura del subsuelo, en dirección preferentemente Norte-Sur, lo cual queda evidenciado por los gráficos frecuencia-azimut obtenidos para el centro del área urbana. Esta inducción disminuye conforme se tiende hacia los extremos, considerando que el espesor del subsuelo disminuye conforme se tiende hacia los cerros, donde la inducción de la energía es predominante a más altas frecuencias y en dirección Este – Oeste. Finalmente, se concluye que la estructura de la cuenca es determinante para la respuesta de sus suelos ante la ocurrencia de sismos, porque al canalizar las ondas a pesar que son de bajas frecuencias pudieran reflejarse o refractarse y amplificar su efecto.

#### **6.1.4. Sectorización de los suelos en función de su periodo dominante (To)**

El mapa con la distribución en superficie de los  $T_o$  obtenidos para Ica se presenta en la Figura 35 y para su análisis se ha visto por conveniente considerar tres criterios: 1) Se define como radio de confiabilidad a 10 metros; 2) Se considera como periodos dominantes asociados a la respuesta del suelo al rango de 0.1 y 1.0 segundos y como secundarios, a periodos mayores; 3) Se considera relevantes aquellos sectores cuyos

factores de amplificación son mayores a 3 veces. Para mayor comprensión de los resultados obtenidos, en el mapa de isoperiodos se ha considerado los valores de periodos dominantes en negro y en celeste los secundarios.

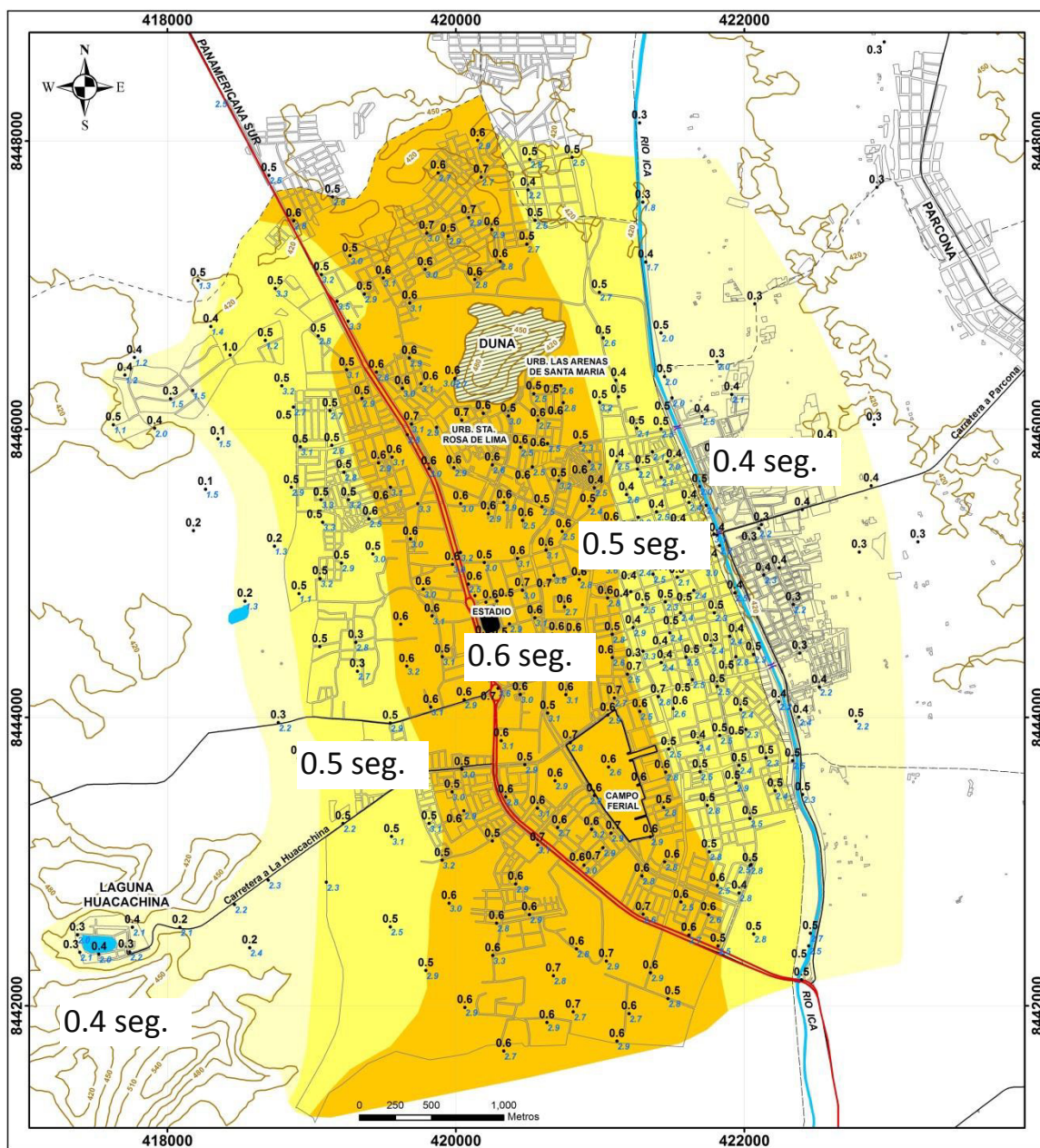
Según la Figura 35, los periodos de entre 0.3 y 0.4 segundos, se distribuyen principalmente hacia el sector Este, en las márgenes del río Ica, con una mayor incidencia hacia su margen izquierda. En el cercado de la ciudad de Ica se identifica periodos dominantes de 0.5 segundos que rodea a las áreas con periodos más bajos. Asimismo, los periodos menores e iguales 0.5 tienden a distribuirse hacia la periferia Oeste de la ciudad. En la zona céntrica del área urbana de Ica, por donde cruza la Carretera Panamericana Sur, predominan periodos entre 0.5 y 0.6 segundos. En este sector, se encuentra la duna entorno al extremo Norte de la Urb. Sta Rosa, el Estadio monumental de Ica y el Campo Ferial de Ica.

Para el segundo rango de periodos, los valores de 2.5 a 3.0 se concentran también en la zona céntrica del área urbana de Ica y se tienden a valores menores conforme se avanza hacia los extremos Oeste y Este. Hacia la margen izquierda del río Ica, este rango de periodos desaparece.

De acuerdo a estos resultados, se puede conocer el espesor del estrato sedimentario, mediante la relación  $T_0 = 4H/V_s$ , donde  $T_0$  es el periodo dominante,  $H$  el espesor del estrato y  $V_s$  la velocidad. Asumiendo,  $V_s = 400$  m/s y  $V_s = 800$  m/s y  $T_0$ , igual a 0.4, 0.5 y 0.6 segundos, se calcula espesores del estrato de 40, 50 y 60 metros, que se emplaza sobre un estrato más profundo ubicado a 80, 100 y 120 metros de profundidad. Los resultados muestran que los mayores espesores, para el estrato sedimentario, se presentan en medio del área urbana de Ica y conforme tienden hacia el río Ica, estos disminuyen a espesores menores a 40 metros.

En la laguna de La Huacachina, al considerar  $T_0$  de 0.3 y 0.4 segundos, se calcula espesores del estrato sedimentario entre 30 a 80 metros. Usando este procedimiento y periodos de 3.3 segundos (0.3 Hz) y velocidades de 800 m/s se estaría considerando espesores de más de 600 metros, siendo es valor incoherente con las características geológicas y geomorfológicas de la zona.





**Figura 35.** Distribución de los periodos dominantes en la ciudad de Ica y su sectorización considerando periodos de 0.6, 0.5 y 0.4 segundos.

## 6.2. CARACTERIZACIÓN FÍSICA DEL SUELO

### 6.2.1. Perfil de velocidad de los suelos de la ciudad de Ica

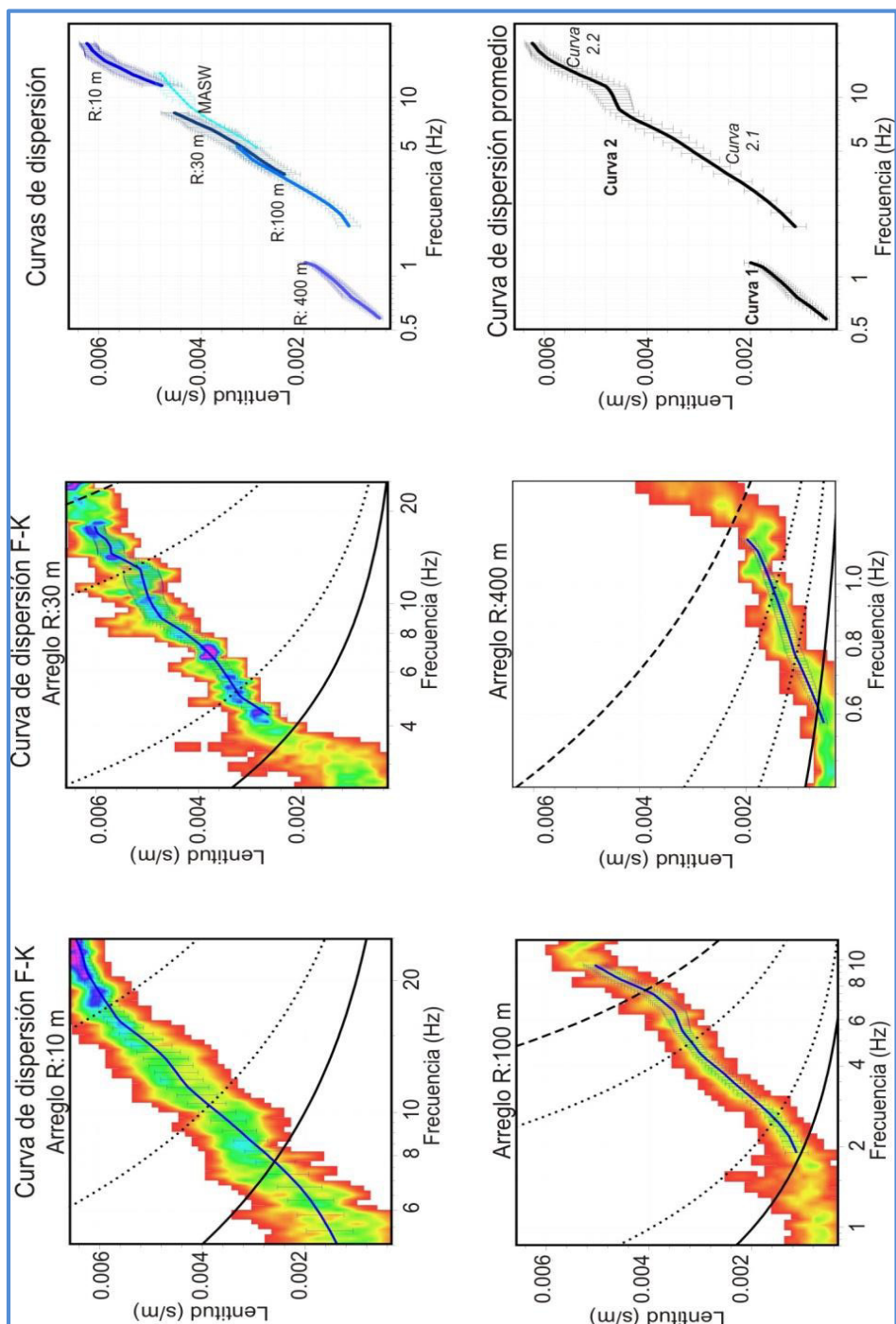
A fin de obtener perfiles de velocidad que permitan conocer las características físicas del subsuelo, se aplican de manera independiente métodos F-K, MASW y MAM, para finalmente correlacionar los resultados y caracterizar con mayor certeza la estructura del suelos bajo la ciudad de Ica.

#### *1) Perfil de velocidad obtenido como el método de F-K*

En la Figura 36, se muestra la gráfica con las cuatro curvas de dispersión, obtenidas considerando arreglos circulares de 10, 30, 100 y 400 metros de radio. En general, las curvas muestran una misma tendencia y se traslapan a distancias de 10, 30 y 100 metros; mientras que la obtenida para el arreglo de 400 metros sigue otra tendencia bien definida.

La curva de dispersión promedio, define que entre 1 y 2 Hz no hay continuidad, sugiriendo que la curva con valores menores a 1Hz y mayores a 2 Hz, no se asocian a una misma fuente generadora. La curva de 2 a 20 Hz, presenta una moderada deflexión a la frecuencia de 8 Hz que pudiera asociarse a la presencia de una interfase superficial entre suelos de diferente consistencia.

Para invertir la curva, por su complejidad, se considera la presencia de dos gamas de frecuencias que corresponderían a diferentes modos de vibrar de las ondas Rayleigh. Según los resultados, la **Curva 1** presenta velocidades de fase (1/lentitud) que varían entre 600 – 2000 m/s para frecuencias de entre 0.6 -1.0Hz y la **Curva 2**, con velocidades de fase (1/lentitud) de entre 170 y 800 m/s para frecuencias de 2.0-20 Hz.



**Figura 36.** Curvas de dispersión, lentitud vs frecuencia (Slowness vs Frequency), obtenidas con la aplicación del método F-K y delimitadas por sus curvas de confiabilidad. Los arreglos circulares realizados en el Campo Ferial de Ica con radios de 10, 30, 100 y 400 metros. En el extremo derecho se muestran las curvas de dispersión obtenidas para los diferentes arreglos sísmicos y el promedio de estas curvas.



Como resultado final, se obtuvieron cuatro perfiles de velocidad para el subsuelo, debido a que se consideró 4 escenarios donde interviene el Modo fundamental de propagación de las ondas Rayleigh y sus modos superiores (1st y 2nd modo)

● **Escenario 1:** La Curva1, corresponde a un Modo Fundamental de las ondas Rayleigh y la Curva 2, es subdividida en el 1st Modo Superior (Curva 2.1) y 2nd Modo superior (Curva 2.2) de las ondas Rayleigh.

● **Escenario 2:** La Curva1, corresponde a un Modo Fundamental y Curva 2, a un 1st Modo Superior.

● **Escenario 3:** La Curva 1, corresponde a un Modo Fundamental.

● **Escenario 4:** La Curva 2, corresponde a un Modo Fundamental.

Los resultados conseguidos a partir de la inversión de la curva de dispersión, con su correspondiente perfil de velocidad ( $V_s$ ) y función de transferencia teórica (FTT) derivada de su perfil son mostrados en la Figura 37. La FTT obtenida para cada escenario, permite validar los resultados mediante el grado de correspondencia de la Frecuencia fundamental de respuesta del suelo al compararla con la Función de transferencia empírica (FTE) calculada con el método de razones espectrales  $H/V$  (punto IC-33, ubicado en el centro del arreglo circular). Si en ambos gráficos, coincide el pico de la frecuencia fundamental, se asume que los cálculos son correctos; sin embargo, estos deben ser coherentes con las condiciones geomorfológicas y estratigráficas del medio donde se desarrollan. La correlación de todos estos aspectos, permite considerar al perfil analizado como representativo de la zona donde fue realizado.

Los resultados obtenidos para cada escenario son:

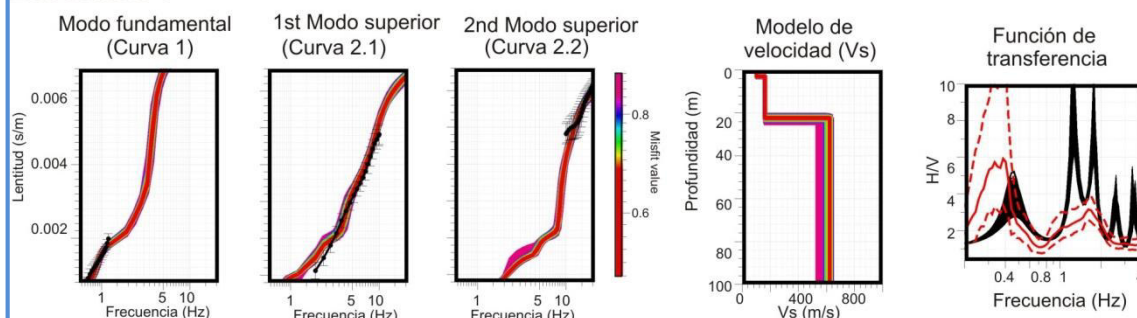
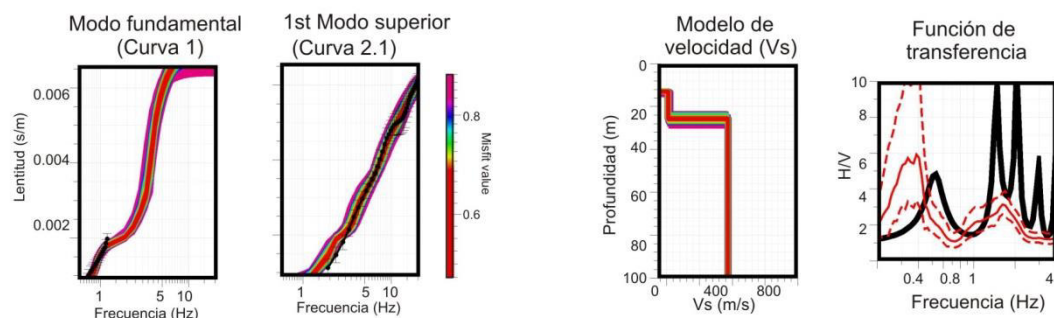
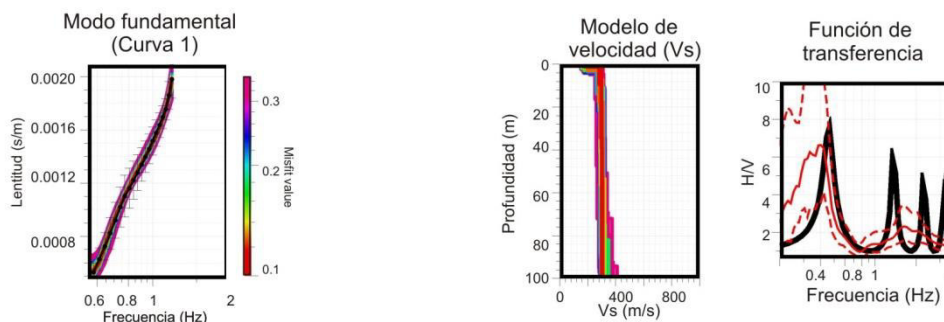
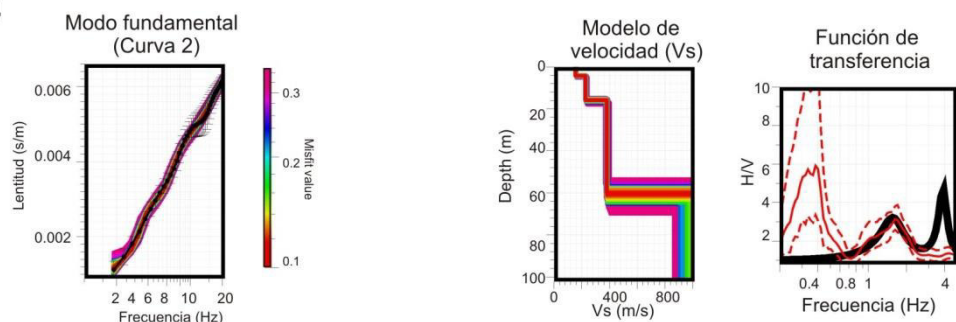
-En los **escenario 1, 2 y 3**, se consideró la **Curva 1** como el Modo fundamental de propagación de las ondas Rayleigh y la **Curva 2**, como modos superiores según lo indicado previamente. En el escenario 1, se obtiene dos capas, la primera con “velocidades de ondas de corte” ( $V_s$ ) menores a 180 m/s y espesores de 25 metros, la segunda con velocidades de 240 m/s y más de 80 metros de espesor.

De manera similar, en el escenario 2 la primera capa presenta velocidades menores a 60m/s y espesores de hasta 25 metros, además de una segunda con velocidades de 600 m/s y espesores de más de 80 metros. Para el escenario 3, se define una sola capa con velocidades de 280 m/s y profundidad indefinida, pero que aparentemente superaría los 100 metros.

La función de transferencia teórica (FTT), obtenida para estos tres escenarios, muestra un predominio de 0.5 Hz y al compararla con la Función de transferencia empírica (FTE) obtenida con el método de razones espectrales (H/V) para el punto IC-33, sobresalen las frecuencias a 0.4 Hz y 3.0 Hz, muestra una proximidad entre las frecuencias bajas. Sin embargo, estos no muestran coherencia con las condiciones geomorfológicas locales de la zona; por lo tanto, se evidencia su poca confiabilidad (Figura 37).

-En el **escenario 4**: Se considera, la **Curva 2** como el Modo fundamental de las ondas Rayleigh, obteniéndose un modelo unidimensional de tres capas. La primera capa, presenta velocidades de 160 m/s y un espesor de 6 m, la segunda capa, velocidades de 240m/s y un espesor de 12 metros; la tercera velocidades de 400m/s y espesores de más de 40 metros, correspondiendo a suelos compuestos por material aluvial medianamente sueltos a medianamente compactos. Bajo estas capas, a los 60 metros de profundidad; se encuentra el semi-especio con velocidades que superan los 900m/s correspondiendo a estratos rígidos o roca fracturada.

A partir de este perfil de velocidades obtenemos la Función de Transferencia Teórica (FTT), que al comparar con la Función de Transferencia Empírica para el punto IC-33 (FTE), coinciden la frecuencia fundamental de ambas a 1.8 Hz. Los resultados obtenidos son consistentes con la geología, geomorfología y estratigrafía de la zona. Asimismo, muestran la presencia de tres interfases superficiales ubicadas a 4, 16 y 60 metros de profundidad. Un primer estrato de baja velocidad que correspondería a material aluvial (suelos arenosos), seguida de dos estratos sedimentarios, que conforme aumenta la profundidad presenta mayor consistencia.

**Escenario 1****Escenario 2****Escenario 3****Escenario 4**

**Figura 37.** Resultados obtenidos para los 4 escenarios analizados en el ítem 4. De izquierda a derecha, se presenta las curvas de dispersión, perfiles de velocidad ( $V_s$ ) y la correspondencia de la FTT (Función de transferencia teórica – curva negra) obtenida de la inversión del perfil de velocidad con la FTE (Función de transferencia empírica – curva roja) obtenida de las razones espectrales para el punto IC-33.

## **2) Perfil de velocidad obtenido como los métodos MASW y MAM**

Aplicando los métodos MASW y MAM se obtuvieron tres perfiles sísmicos, para los extremos Este, Oeste y Centro (próximo al río Ica) del área urbana de la ciudad de Ica. Las curvas de dispersión obtenidas con MASW consideran registros sísmicos generados por una fuente inducida y presentan mayor resolución a niveles superficiales del suelo y MAM, considera registros de vibración ambiental y presenta resolución a mayores niveles de profundidad, complementándose ambas. Las líneas presentan longitudes entre 120 y 240 metros.

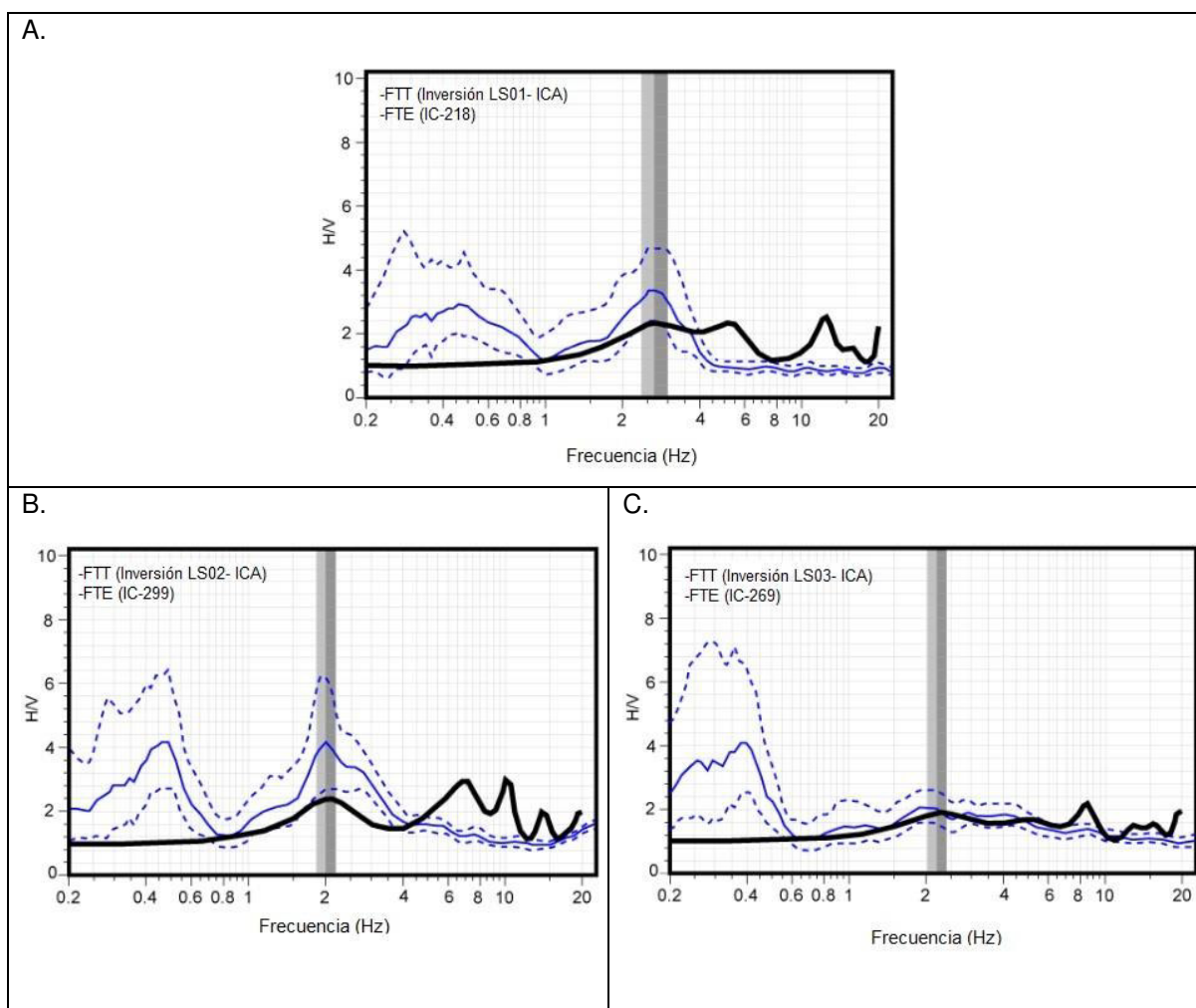
La combinación de ambas técnicas permitió obtener los perfiles de velocidad ( $V_s$ ) hasta profundidades promedio de 60 y 100 metros. Los resultados sugieren la presencia de cuatro capas en el subsuelo (Figura 38, Tabla 5): la primera con  $V_s$  entre 170 y 180 m/s, correspondiendo a suelos blandos compuestos de materiales aluviales sueltos (suelos arenosos). En el perfil LS02, esta capa presenta espesores de 6 metros (ubicado próximo al cauce del río Ica); la segunda con  $V_s$  entre 250 y 300 m/s relacionado a estratos blandos a moderadamente rígidos compuesto por material aluvial medianamente suelto con espesores de 15, 32 y 36 metros, el mayor espesor se presenta en el perfil LS03 (Extremo Oeste del área de estudio); la tercera capa, con  $V_s$  entre 460 y 520 m/s relacionados a estratos moderadamente rígidos a rígidos con espesores entre 50 y 60 metros y la cuarta con velocidades de 600 a 760 m/s correspondiente a suelos rígidos y/o roca fracturada. El semi-espacio, tiene una velocidad  $V_s$  mayor a los 800 m/s. Las velocidades bajas encontradas en el perfil LS02, por su proximidad al río Ica, corresponde a los depósitos de sedimentos recientes que acarrea el río; asimismo, este sector es históricamente inundable.

**Tabla 5.** Capas sísmicas obtenidas para la ciudad de Ica. Las líneas LS01 y LS03, fueron obtenidas en los extremos Este y Oeste del valle de Ica; y LS02, sobre el cauce del río Ica.

Capa sísmica	Velocidad Vs (m/s)	LS01	LS02	LS03	Perfil del suelo
<b>1</b>	120-200	-	170	-	Suelo blando
<b>2</b>	200-300	250	300	250	Suelo blando a moderadamente rígido
<b>3</b>	300-500	460	520	470	Suelo rígido
<b>4</b>	500-800	610	700	760	Suelo muy rígido o roca muy fracturada
<b>Semi-espacio</b>	>800				Roca fracturada

**Figura 38.** Izquierda: curvas de dispersión obtenida con MASW, y MAM. Derecha: Perfiles de velocidad y la ubicación espacial de los puntos donde se realizaron los arreglos.

Seguidamente, se procederá a validar los perfiles de “velocidad de ondas de corte” ( $V_s$ ) obtenidos con los métodos MASW y MAM (Figura 38); usando el método de Haskell. Los perfiles fueron invertidos para calcular la función de transferencia teórica (FTT) para los perfiles LS01, LS02 y LS03 con el objetivo de buscar su correspondencia con la función de transferencia empírica (FTE) obtenida a partir de los registros de vibración ambiental para los puntos IC-2018, IC-299 y IC-269, ubicados próximos a cada una de las líneas sísmicas. Los resultados evidencian que a pesar de la baja amplificación existe una clara correspondencia a frecuencias de 2.0 a 3.0 Hz, siendo estas coherentes con las características físicas de cada zona; por lo tanto, se evidencia que estos resultados son altamente confiables.



**Figura 39.** Función de transferencia teórica (FTT), calculada mediante la inversión de los perfiles de velocidad ( $V_s$ ) obtenidos con los métodos sísmicos y el método de Haskell (líneas en negro) y la Función de transferencia empírica (FTE), obtenida con H/V para puntos ubicados próximos a las líneas sísmicas (líneas en azul).

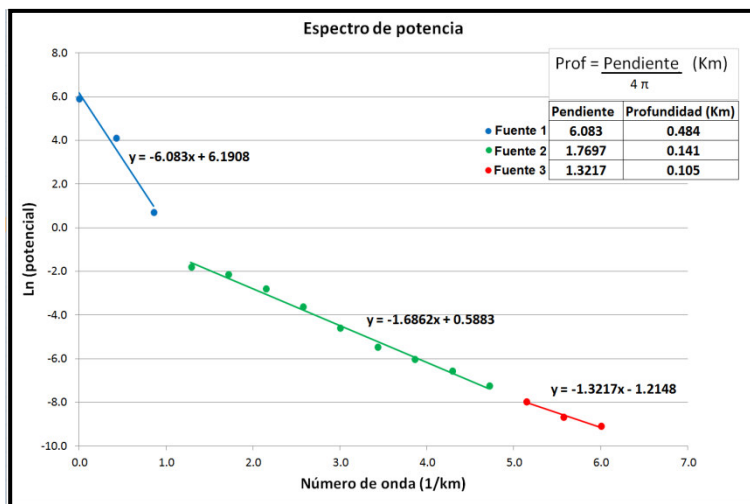
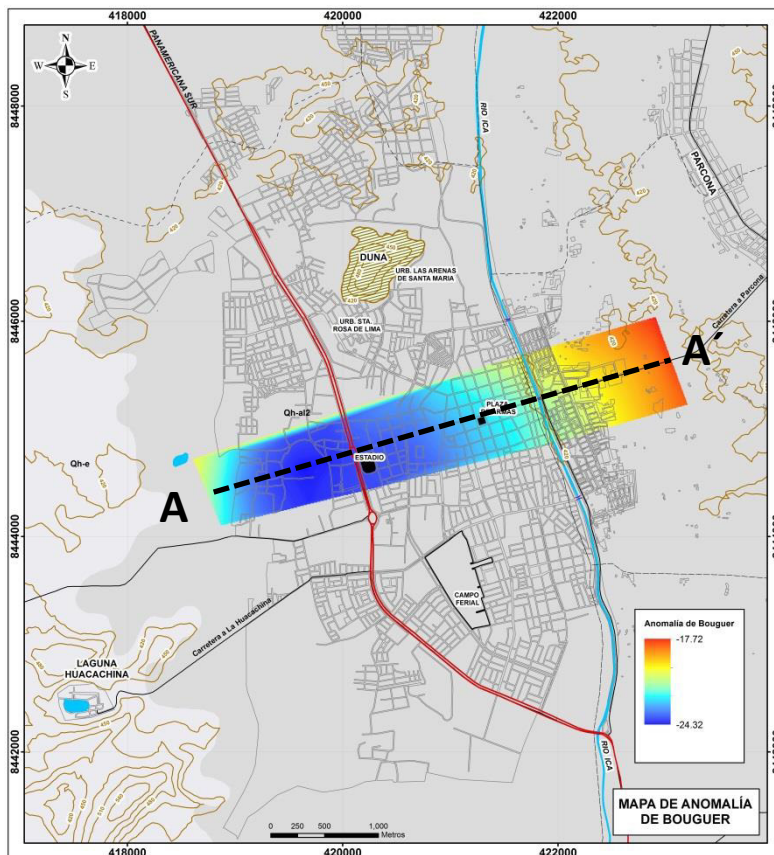
### 6.3. GEOMORFOLOGÍA DE LA CUENCA DE ICA BAJO LA CIUDAD DE ICA

#### 6.2.1. Método gravimétrico

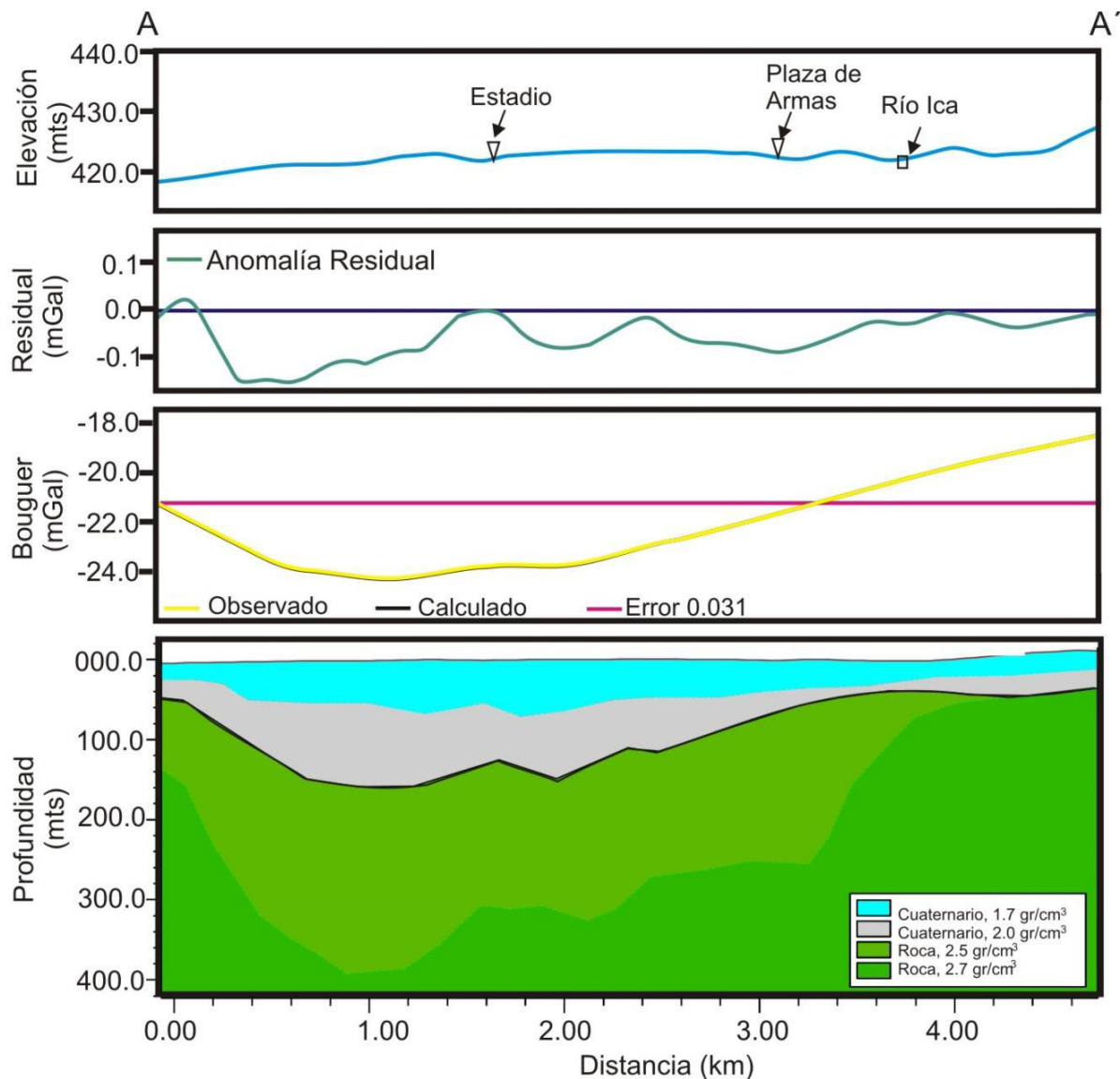
En la Figura 40, se presenta el mapa de anomalías residuales de Bouguer obtenidos en este estudio y en él se observa que hacia el extremo Oeste se concentran los valores gravimétricos negativos más altos, -20 y -24 mGal y hacia su extremo Este, próximos al río Ica, los valores gravimétricos tienden a disminuir (-17 mGal). En esta última dirección, se encuentra la localidad de Parcona (a cota mayor respecto a la ciudad de Ica) asentada sobre afloramientos de roca volcánica (monzonitas y tobas). El valor estándar de la densidad para este tipo de afloramientos es de  $2.67 \text{ g/cm}^3$ , en este estudio se consideró de  $2.5$  y  $2.7 \text{ g/cm}^3$  para el afloramiento rocoso.

Asimismo, mediante el espectro de potencia (Figura 40), se precisa la máxima profundidad del afloramiento rocoso. Aquí los datos muestran tres tendencias cuyas pendiente son proporcionales a profundidades promedios de 480, 150 y 100 metros, que se asocian a fuentes regionales y locales (interfase suelo-roca). Se presenta, en la figura 41, el perfil de elevación, residual y Bouguer (perfil A-A') y la geoforma de la interfase entre los depósitos sedimentarios y el basamento rocoso ( $\rho=2.5$  y  $2.7 \text{ g/cm}^3$ ) con capas superficiales ( $\rho=2.5 \text{ g/cm}^3$ ), de donde se deduce que el afloramiento rocoso presente bajo los depósitos sedimentarios de la cuenca de Ica (C.I.) es irregular. Según estos resultados, la máxima profundidad media estudiada es de 150 metros hacia el extremo Oeste de C.I. y de hasta los 60 metros, hacia su extremo Este. Estos resultados evidencian que la irregularidad de la geoforma, en la base rocosa de la cuenca de Ica (C.I.), hay un predominio de forma cóncava profunda bajo el extremo Oeste del área urbana de Ica (altura de la Panamericana Sur), y que hacia su extremo Este, a niveles superficiales, cambia bruscamente tendiendo a la subhorizontalidad, para luego progresivamente incrementar su pendiente conforme tiende hacia la Localidad de Parcona (mayor cota).





**Figura 40.** Arriba: Mapa de Anomalías residuales de Bouguer. Abajo: Espectro de potencia radial. El cociente de las pendientes de las rectas entre  $4\pi$ , es proporcional a la profundidad de la interfase.



**Figura 41.** En el extremo superior, se muestra el perfil de elevación,, residual y Bouguer, obtenidos para el Perfil A-A'. En el extremo inferior se presenta, la geoforma de la interfase entre los depósitos sedimentarios y el basamento rocoso ( $\rho=2.5$  y  $2.7 \text{ gr/cm}^3$ ) con capas superficiales ( $\rho=2.5 \text{ gr/cm}^3$ ).

#### 6.4. ZONIFICACIÓN SÍSMICA DE LOS SUELOS DE LA CIUDAD DE ICA

La integración de los parámetros estimados con los diferentes métodos geofísicos (sísmicos, gravimétricos) y con las características geo-ambientales locales de la ciudad de Ica (geomorfología, geología, hidrología, geotecnia, geofísicos y tectónicos) permitieron definir la existencia de diferentes tipos de suelos predominantes en la ciudad de Ica.

*Los periodos mayores a 2.0 segundos, al no ser asociados directamente al tipo de suelos donde se asienta la ciudad de Ica, sino a la geoforma de la cuenca de Ica, estos no fueron utilizados en la zonificación sísmica de la ciudad de Ica, pero si son considerados como un periodos secundario que influye en las respuesta dinámica de los suelos de la ciudad de Ica.*

En base a las particularidades físicas y dinámicas de los suelos, estos son tipificados y zonificados, considerando lo indicado en la Norma de diseño Sismorresistente vigente. se establece la existencia de 4 zonas indicadas en la Figura 42, cuyas características son:

**ZONA I:** *Comprende a suelos Tipo S1, que corresponde a suelos rígidos, con velocidades de ondas de corte ( $V_s$ ) que varían entre 500 y 900 m/s para suelos de Ica, y conformados por estratos de grava coluvial que subyacen a estratos menores de material (arenas, limos) poco consolidado. Los periodos predominantes son de 0.1 y 0.3 segundos. En el mapa de zonificación, se observa que los periodos menores tienden a distribuirse hacia la localidad de Parcona y cerro Los Frailes (extremo Este del área de estudio).*

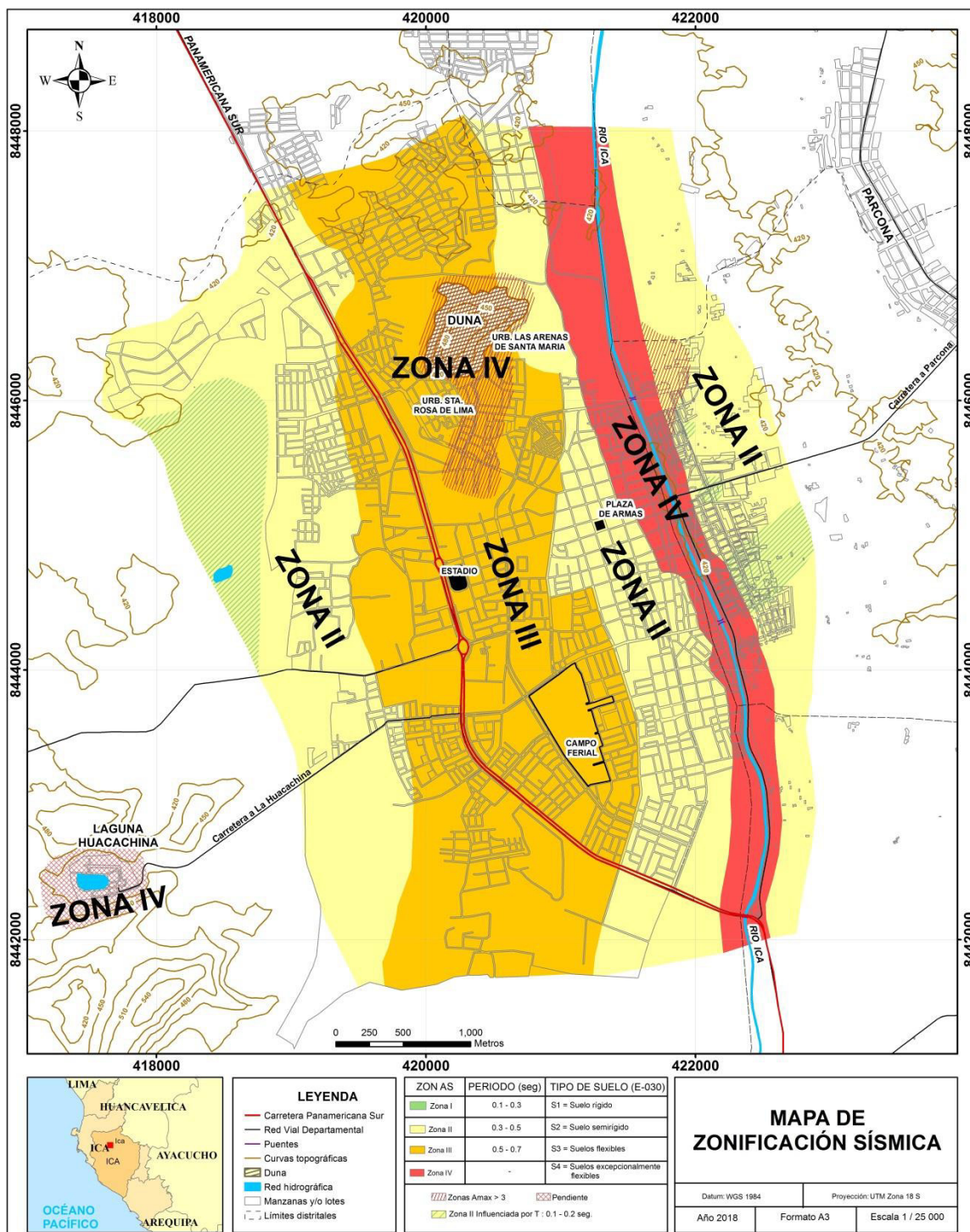
**ZONA II:** *Comprende a suelos Tipo S2, que corresponden a suelos rígidos a moderadamente rígidos, con velocidades de ondas de corte ( $V_s$ ) que varían entre 300 y 500 m/s, y conformados por estratos sedimentarios, con predominio de arenas y arcillas con espesores de entre 20 y 50 metros, asentados sobre estratos de grava. Los periodos predominantes en esta zona son de 0.3 y 0.5 segundos. Esta zona ha sido identificada en dos sectores: El primero, incluye a ambas márgenes*

*del río Ica, extendiéndose hacia el cercado del área urbana de Ica, y en donde predominan las construcciones más antiguas. Asimismo, hacia el extremo Este del campo ferial donde se ubican estructuras recientes y la Universidad de Ica. El segundo sector, hacia el extremo Oeste del área urbana, donde se tiene el predominio de zonas de cultivo y de expansión urbana.*

**ZONA III:** *Comprende a suelos Tipo S3; es decir, suelos blandos superficiales, que se asientan sobre suelos semirrígidos con velocidades que fluctúan entre 250 y 400 m/s, y conformados por estratos sedimentarios con predominio de arena, limo y arcilla, de gran espesores (más de 50 metros de potencia), subyaciendo a estratos de grava, los cuales responden a periodos mayores a 0.5 segundos. Esta zona se ha identificado entre los dos sectores de la zona II, sobre un área longitudinal, a lo largo de la Panamericana Sur y que contiene a la Urb. Santa Rosa, al estadio de Ica y el campo ferial.*

**ZONA IV:** *Comprende a suelos Tipo S4; es decir, suelos blandos y/o con efectos de sitio o topográficos. En superficie presentan grandes acumulaciones de arena, materiales de cultivo con presencia de humedad y/o saturación en profundidad. Su comportamiento dinámico presenta condiciones excepcionales ante la ocurrencia de sismos (amplificación del suelo). Este sector se delimita por una franja angosta a lo largo del río Ica (zona inundable), sobre y próximo a la duna formada sobre el cerro Saraja, en superficie hay el predominio de suelos muy sueltos. Asimismo, están presentes hacia el extremo SO, en el sector de la Huacachina.*

Este mapa obtenido para la urbe de Ica, es una de las herramientas más relevantes para mitigar la destrucción que puedan ocasionar los sismos. Su importancia es evidenciar sectores que pudieran amplificar las vibraciones del suelo ante las solicitaciones sísmicas. Este comportamiento, depende de sus condiciones físicas locales y la interacción con las ondas sísmicas, que en conjunto pueden modificar el contenido frecuencial y la amplificación de las ondas.



**Figura 42.** Mapa de zonificación sísmica para la ciudad de Ica.

## 6.5. DISCUSIÓN

Los datos que se han generado en este estudio, aplicando diferentes procedimientos geofísicos y su correlación, han permitido conocer las particularidades físicas y dinámicas de los suelos del área urbana, así como su comportamiento dinámico ante la ocurrencia de un sismo de gran magnitud.

El método de razones espectrales evidencian, que el suelo de la ciudad de Ica responde a periodos largos con valores entre 0.5 a 1.2 segundos (0.8 y 2.0 Hz) y a 2.0 segundos (0.5 Hz). Estos resultados tienen correspondencia con efectos 1D descritos por Seed et al (1998), y que se correlaciona con el contraste de impedancia entre diferentes materiales (*Pilz et al, 2010*) y en este caso, se daría entre los suelos arenosos y la roca encajante. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que en *algunos casos*, un solo pico de respuesta evidencia un suelo homogéneo y más de un pico a un suelo heterogéneo y *en otros casos*, estos picos podrían no estar directamente asociados a la estratigrafía de los suelos, sino a efectos no lineales que permiten realizar inadecuadas interpretaciones, de ahí la importancia de analizar cuidadosamente cada uno de los picos de frecuencias contenidos en las señales sísmicas.

Estudios realizados por Chávez-García et al. (1999); Cornou y Bard (2004), evidenciaron la existencia de efectos de resonancia en 2D y 3D que influyen en la respuesta del suelo alterando la forma de la curva H/V. Una de las evidencias obtenidas en la cuenca de Ica, es la variación en amplificación de ambos periodos, siendo mayor la amplificación en un rango respecto con al otro y de acuerdo a su ubicación espacial prevalecen y/o desaparecen. Por otro lado, considerando la variación azimutal de la contribución de la energía que incrementa la amplitud del espectro, se observa que para 2 segundos, las contribuciones mayormente se dan en dirección N-S (eje paralelo al río Ica) y para periodos mayores a 0.5 segundos en dirección E-O (eje perpendicular al río). El origen de este efecto podría ser debido a la fuente o aún efecto de trayecto. Estos resultados, sugieren que los periodos más largos, se deben a un efecto regional que entra en resonancia con los depósitos locales de gran espesor de la cuenca de Ica, de ahí que presenten mayor o menor amplificación. Asimismo, se ha observado que conforme se



tiende hacia la localidad de Parcona (Extremo Este del área de estudio), el periodo de 2.0 segundos desaparece, correlacionándose con la disminución del espesor de la capa superficial del suelo por encontrarse, topográficamente, a mayor altura respecto a la ciudad de Ica.

El análisis espacio-periodo de respuesta de los suelos de Ica, permite definir la presencia de tres rangos de periodos distintos: los periodos superiores 2.0 segundos, influenciado por la geoforma profunda de la cuenca de Ica; los periodos de 0.5 y 1.2 segundos asociado a depósitos sedimentarios de gran potencia y zonas de transición y los periodos inferiores a 0.5 segundos, influenciado por estratos sedimentarios superficiales

A fin de conocer de manera indirecta la geometría de la cuenca de Ica (C.I.), se ha realizado el análisis de las amplificaciones máximas relativas obtenidas por medio de las razones espectrales, en términos de amplitud, periodo y ubicación del punto (*Semblat et. al. 2002*) y los resultados obtenidos, permite considera lo siguiente:

- *En la zona plana de la C.I., los periodos de 2.0 segundos presentan amplificaciones máximas relativas de hasta 4 veces y los periodos de 0.5 y 1.2 segundos menores amplificaciones.*
- *En el extremo Este de C.I:*
  - a) *Hacia la margen derecha del río Ica, los periodos de 2.0 segundos se aproximan en amplitud a los periodos de entre 0.5 y 1.2 segundos, fluctuando entre 2 a 3 veces.*
  - b) *Hacia la margen izquierda del río Ica, los periodos de 2 segundos tienen a desaparecer y los periodos menores a 1.2 segundos llegan a incrementar su amplificación hasta en 5 veces.*
- *En la zona alta de la C.I., próximo a la localidad de Parcona, los periodos de 2.0 segundos desaparecen y para periodos menores a 0.5 segundos se observa el incremento significativo en la amplificación.*

*En conjunto, estos datos manifiestan que en la zona céntrica de Ica, los periodos de 2.0 segundos presentan las mayores amplificaciones y conforme tiendan hacia el extremo*

*Este de la cuenca de Ica (CI), estos periodos desaparecen, sugiriendo que conforme se tiende hacia los extremos de la cuenca los depósitos sedimentarios disminuyen en espesor. Estos periodos tan bajos son asociados a fuentes regionales atrapadas y moduladas por la geomorfología de las cuencas (Cornou et. al. 2004), siendo este el caso de la C.I. Por otro lado, los periodos menores a 1.2 segundos, se correlacionan directamente con las características geo ambientales de la zona, donde los el espesor de los sedimentos depositados sobre la cuenca, disminuyen conforme tienden a una mayor cota (en dirección a Parcona).*

Las investigaciones con arreglos sísmicos lineales y circulares permitieron determinar que por debajo del Campo Ferial de Ica, sobresalen cuatro estratos, el primero con velocidades ( $V_s$ ) menores a 200m/s que se refieren a suelos blandos de 6 metros de espesor ( $H$ ); el segundo con velocidades de 240 a 300m/s propio de suelos semirrígidos de 15 y 40 metros de espesor; el tercer estrato con velocidades de entre 400 y 500 m/s propio de suelos semirrígidos-rígidos ( $H$ :60m) y un cuarto estrato con velocidades de entre 500 y 700 m/s, cuya interfase con el semi-espacio fluctúa alrededor de los 100 y 150 metros de profundidad. El semi-espacio presenta velocidades de hasta 900 m/s. Mediante la relación  $H=V_s/4F$  (SESAME, 2009),  $V_s$  de 500 y 800m/s y  $T_o$  de 0.5 y 1.2 segundos ( $T_o=1/F$ ), se define dos interfaces resaltantes en la estratigrafía del subsuelo a 60 y 150 metros de profundidad. En caso de considera periodos de 2.0 segundos, corresponderían a suelos cuyos espesores superan los 300 metros

De acuerdo al mapa de isoespesores, obtenido mediante la interpolación spline (aproximaciones polinomiales suaves), se define la existencia de tres sectores bien marcados y en profundidad, la presencia un depósito de sedimentos que experimenta cambios en su espesor y consistencia, conforme alcanza mayores profundidades (Figura 43):

**-Sector 1**, se ubica en el extremo Oeste del área urbana de Ica, y considera al estadio de Ica, la Carretera Panamericana Sur, la Urb. Santa Rosa, el campo ferial de Ica, entre otros. Se estima, para los depósitos sedimentarios, espesores de más de 150 metros; siendo el de mayor espesor con respecto a otros sectores. Este sector corresponde a la zona céntrica de la Cuenca de Ica (C.I.).

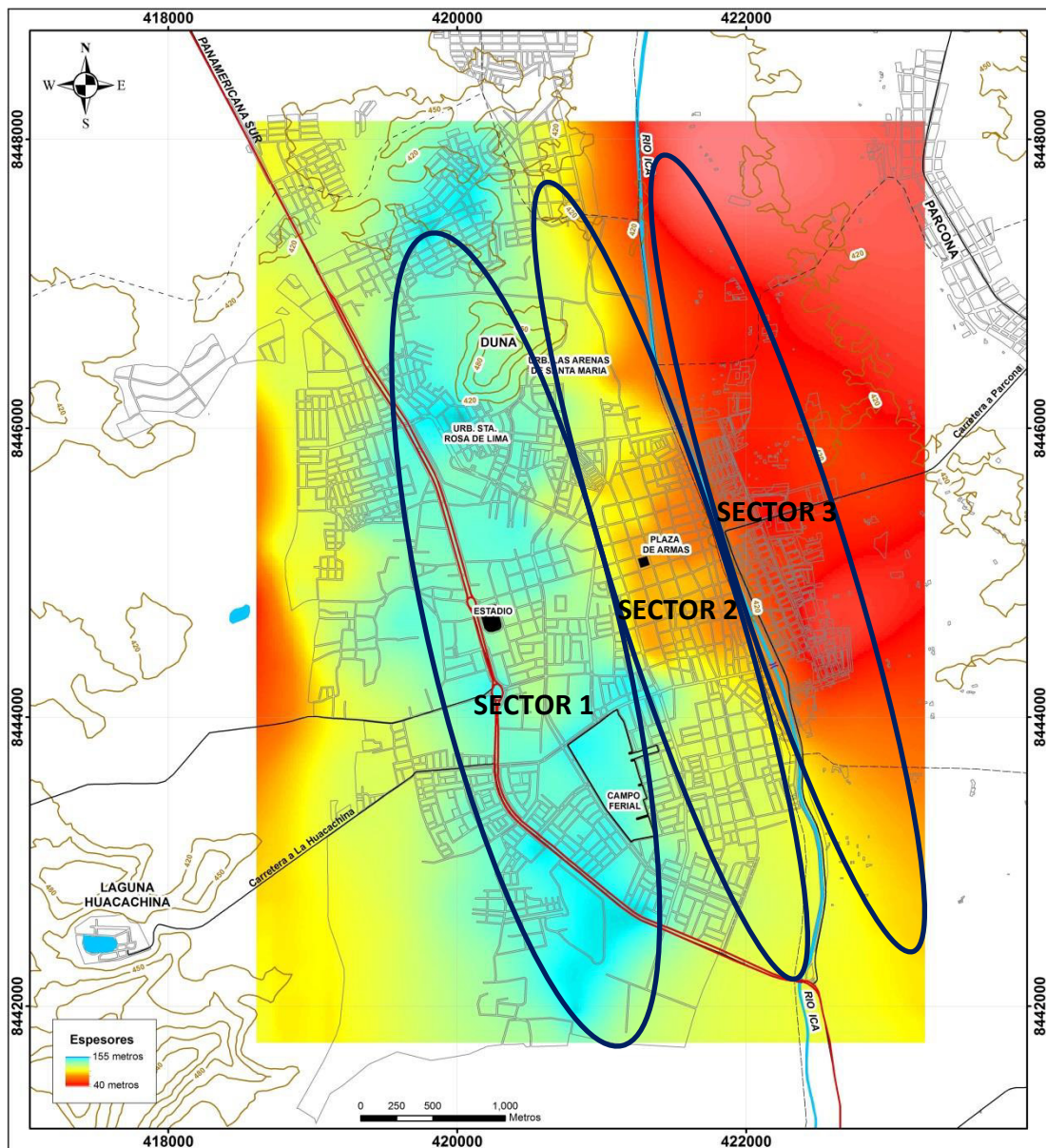
**-Sector 2**, se ubica en la zona céntrica del área urbana de Ica, y considera a la plaza de Armas, al canal del río Ica, las estructuras más antiguas de la ciudad, entre



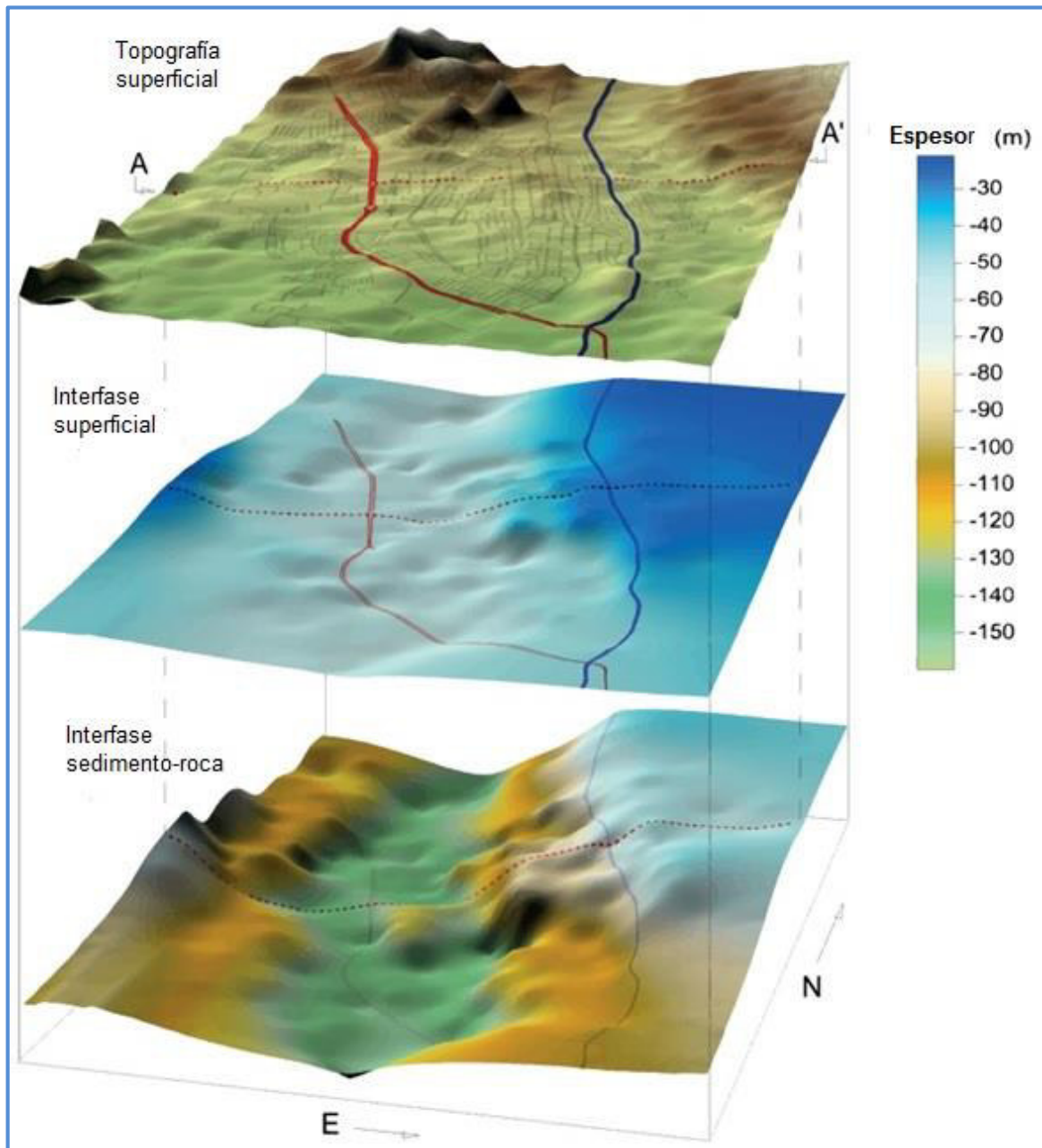
otros. Se estima, para los depósitos sedimentarios, espesores entre 40 y 60 metros. En profundidad, el cambio brusco en el espesor de la capa sedimentaria se da entre el sector 1 al 2, evidencia un importante cambio en la geomorfología de la cuenca de Ica (C.I.).

**-Sector 3**, se ubica en el extremo Este del área urbana de Ica, y considera a las viviendas de construcción recientes ubicadas en la margen izquierda del río Ica, y la carretera hacia la localidad de Parcona (ubicada a una cota mayor respecto a la ciudad de Ica). Se estima, para los depósitos sedimentarios espesores de hasta los 40 metros, con tendencia a disminuir conforme se tienda a Parcona. Estos resultados sugieren que este sector sería el extremo Este de la cuenca de Ica (C.I.) se caracteriza por presentar mayor pendiente con respecto a su extremo Oeste, evidencia que la geoforma del basamento de la cuenca de Ica, es irregular y mixta.

Según estos resultados, los estratos presentan de manera clara dos interfases a 60 y 150 metros de profundidad, la primera, correspondería al paso de material aluvial medianamente suelto a material medianamente compacto y la segunda, a la interfase suelo-roca, con estos resultados debe entenderse que la geomorfología de la cuenca de Ica es irregular (Figura 44).



**Figura 43.** Mapa de iso-espesores del estrato sedimentario emplazada sobre la cuenca y bajo el área urbana de Ica.

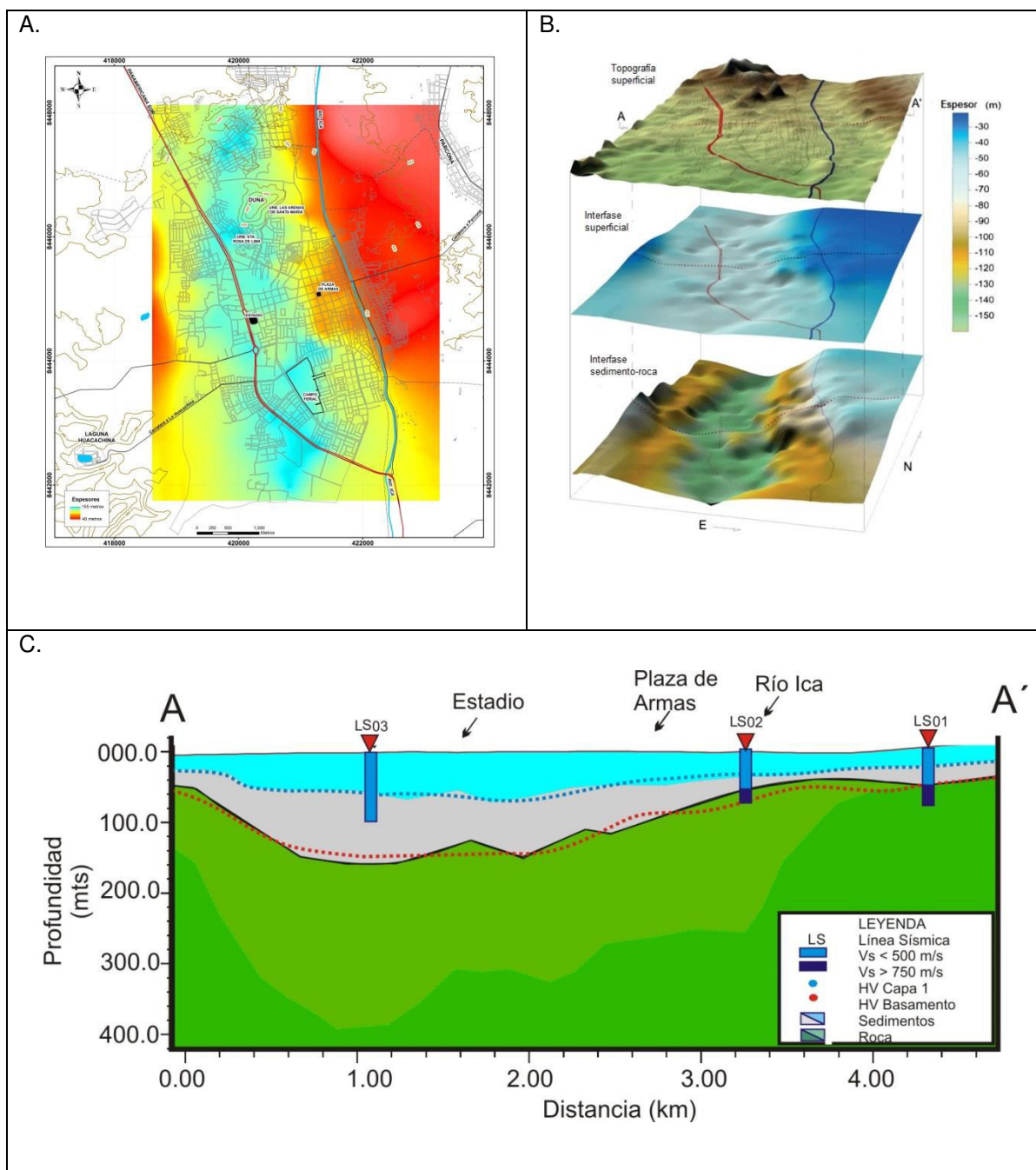


**Figura 44.** Esquema 3D, de las curvas de iso-profundidades a 60 y 150 metros, de la capa sedimentaria y su geomorfología.

A partir del método gravimétrico, la distribución de las anomalías residuales de Bouguer muestra un cambio brusco en sus valores, conforme se tiende hacia el extremo Este de C.I. Y hacia el extremo Oeste de la C.I. las isoanomalías definen la existencia de cuerpos intrusivos con valores mayores, pero negativos, de entre -20 y -25 mGal y conforme se tienda hacia el río Ica, las isoanomalías tienden a -17 mGal conforme se aproximan al río Ica. El análisis frecuencial de estas anomalías, permite estimar que la profundidad del afloramiento rocoso se encontraría más profundo hacia el extremo Oeste que hacia su extremo Este del área urbana de Ica, llegando a profundidades de 60 y 150 metros.

La integración, tanto de las isoanomalías residuales de Bouguer, las densidades y perfiles de velocidad; así como las profundidades estimadas con los métodos frecuenciales, sugieren que la geoforma de la cuenca de Ica es irregular, con cambios bruscos conforme se tiende hacia su extremo Este (Figura 45) e influye en la respuesta dinámica de los suelos de Ica.

La zonificación sísmica, se realiza en base a las particularidades físicas y dinámicas de los suelos superficiales en la zona de estudio y de las recomendaciones indicadas en la Norma E.030 (Diseño Sismorresistente), en la cual se establece la existencia de 4 zonas que corresponden a suelos rígidos, moderadamente rígidos, blandos y excepcionales.



**Figura 45.** Extremo superior: a) Mapa de Isopropfundidades obtenido a partir de los registros de vibración ambiental y su análisis frecuencial b) Esquema 3D de la geoforma de la cuenca de Ica (C.I.) a partir de la distribución de los periodos dominantes. c) Perfil de la geoforma del basamento de la cuenca sedimentaria de Ica (C.I.), a partir de los resultados obtenidos con los diferentes métodos sísmicos y geofísicos realizados.

## CONCLUSIONES

*La ciudad de Ica se ubica en una región tectónicamente activa, que dio origen a la formación de la cuenca del río Ica y define las condiciones geo-ambientales de todo el sector, de ahí la importancia de analizar la influencia de estas condiciones en el comportamiento dinámico de los suelos de la ciudad, a fin de proponer un modelo 3D de la geoforma del basamento de la cuenca sedimentaria de Ica y proponer un modelo de zonificación sísmica del suelo de Ica. Las conclusiones principales que se desprende de este estudio son:*

- 1. Del análisis frecuencial, se evidencia que los suelos de la ciudad de Ica, responden a dos rangos de frecuencias,  $F_0$  ( $F < 1.0\text{Hz}$ ) y  $F_1$  ( $F \geq 1.0\text{Hz}$ ), para  $F_0$ , predominan valores de entre 0.4 y 0.8 Hz y para  $F_1$  de entre 1.0 y 3.0 Hz, con amplificaciones de hasta 5 veces.*
- 2. El análisis espacio-periodo-amplificaciones relativas del suelos de Ica, permite definir tres rangos de periodos distintos: los periodos superiores 2.0 segundos, influenciado por la geoforma profunda de la cuenca sedimentaria de Ica; los periodos de 0.5 y 1.2 segundos asociado a depósitos sedimentarios de gran potencia y zonas de transición; y los periodos inferiores a 0.5 segundos influenciado por estratos sedimentarios superficiales.*
- 3. En el cercado de Ica, los periodos de 2.0 segundos presentan las mayores amplificaciones y conforme tienden hacia el extremo Este de la Cuenca de Ica (CI) estos periodos tienden a desaparecer, su origen se asocia a fuentes regionales cuya energía queda atrapada y modulada por la geomorfología de la cuenca de Ica. A diferencia, los periodos menores a 1.2 segundos, están directamente relacionados a la estratigrafía de los sedimentos depositados sobre la cuenca.*
- 4. Los métodos sísmicos, evidencian que a niveles superficiales del suelo existen*



*cuatro capas, con velocidades de 200, 300, 500 y 700 m/s, correspondientes a suelos de consistencia blanda a rígidos, con interfases a 6, 15, 40 y 60 metros de profundidad. La interfase con el semi-espacio fluctúa alrededor de los 100 y 150 metros de profundidad, con velocidades mayores a los 900 m/s.*

- 5. A partir del método gravimétrico, se identificaron isoanomalias residuales de Bouguer correspondientes a cuerpos intrusivos, con valores entre -20 y -25 mGal presente hacia el extremo Oeste del área urbana de Ica; así como isoanomalias de -17 mGal en dirección al río Ica. Del espectro de potencia, para estas anomalías se estima que la profundidad del afloramiento rocoso, hacia su extremo Este bajo el área urbana de Ica, alcanza profundidades alrededor de los 150 metros y hacia su extremo Este, profundidades de alrededor de 60 metros.*
- 6. Mediante los métodos sísmicos y el gravimétrico se definió que la geoforma del basamento rocoso de la cuenca de Ica es irregular, con cambios bruscos conforme se tiende hacia su extremo Este, evidenciando una forma mixta entre cóncava y semi-horizontal.*
- 7. La tipificación y zonificación sísmica de los suelos de Ica, fue obtenida con el análisis de datos sísmicos, geofísicos y con las características geo-ambientales locales, que permitió establecer 4 zonas con diferente respuesta dinámica y características físicas: (I) Suelos Tipo S1, con periodos de respuesta de entre 0.2 y 0.3 segundos, conformado estratos de grava y a niveles superficiales por estratos sedimentarias de menor consistencia y espesor; (II) Suelos Tipo S2, con periodos de respuesta de entre 0.3 y 0.5 segundos, cuyos depósitos sedimentario presenta espesores de entre 20 y 50 metros, subyaciendo a estratos de grava; (III) Suelos Tipo S3, con periodos de respuesta >0.5 segundos, cuyos depósitos sedimentarios superan los 100 metros de espesor; (IV) Suelos Tipo S4, que corresponde a suelos blandos, con efectos de sitio. Este sector se delimita por una franja angosta a lo largo del río Ica (zona inundable), extremo norte de la Urb. Santa Rosa (zona de expansión urbana hacia la Duna – arena suelta) y hacia el extremo Oeste de Ica hay lugares con un predominio de suelos muy sueltos. Asimismo, hacia el extremo SO, en el sector de la Laguna Huacachina.*

8. *La interfase suelo-roca de la C.I., bajo la ciudad de Ica, presenta una geoforma irregular alcanzando profundidades de hasta 150 metros con un cambio brusco hasta los 60 metros bajo el cauce del río Ica, lo cual afecta directamente en la respuesta dinámica de los suelos de Ica. Este escenario permite que las ondas sísmicas queden atrapadas, canalizadas y moduladas por esta estructura. Estas múltiples reflexiones y refracciones influyen localmente en la respuesta de los suelos a muy bajas frecuencias y/o periodos que sobrepasan los 2.5 segundos pudiendo ser perjudiciales para edificaciones elevadas (más de 15 pisos) y estructuras que respondan a esos periodos tan grandes.*



## RECOMENDACIONES.

*Al considerar que los suelos de Ica responden a periodos largos, es necesario que para el diseño y construcción de edificios elevados, puentes u otras estructuras, se tenga presente el mapa que establece el tipo de suelo, las particularidades de estos suelos y las indicaciones dadas en la Norma E.030. En este sentido, las edificaciones a diseñarse debieran presentar periodos dominantes menores a 0.5 segundos a fin de no coincidir con los periodos de respuesta del suelo, de lo contrario podrían experimentar un proceso de resonancia.*

*Controlar, la expansión urbana de la ciudad, especialmente hacia el margen izquierda del río Ica, sobre arenales y/o dunas (ejemplo, Urb. Santa Rosa) y en dirección de la Laguna Huacachina, por parte de las autoridades locales a fin de no incrementar el riesgo por sismo en la ciudad.*

*Realizar estudios locales con mayor detalle y a la vez, restringir la construcción de edificaciones sobre zonas de relleno antrópico, por el alto riesgo sísmico que representan, al considerar suelos con baja compactación y heterogeneidad en sus componentes, los cuales permiten tener suelos con un comportamiento dinámico muy complejo.*

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aki, K., y Richards, P.G. (1980) *Quantitative seismology, Theory and Methods*, W. H., San Francisco, 948 pp.
- Aki, K (1957). *Space and time spectra of stationary stochastic waves with special reference to microtremors*. *Bull. Earthq. Res. Inst. Tokyo Univ.*, 35, 415-457.
- Bendezú, R. y Mallqui, J. (1999) *Mapa de peligros y medidas de mitigación de desastres de la ciudad de Ica*. Tesis de grado de la UNI. 135pp.
- Bernal, I. (2002). *Aproximación a un modelo detallado de la sismicidad en el Perú: Características y evaluación de la energía sísmica liberada*. Tesis de Ingeniero, UNSA-Arequipa, Perú.
- Bernal, I. (2006) *Microzonificación sísmica de la ciudad de Tlaxcala – México*. Tesis de Maestría, II-UNAM, México.
- Bonnefoy-Claudet, S., Baize, S., Bonilla, L. F., Berge-Thierry, C., Pasten, C., Campos, J., Volant, P., and Verdugo, R. (2009). *Site effect evaluation in the basin of Santiago de Chile using ambient noise measurements*. *Geophysical Journal International*, 176(3):925–937.
- Bolaños, A. y Monroy, O. (2004): *Espectros de Peligro Sísmico Uniforme – programa MRiesgo*, Tesis para optar el grado de Magister en Ingeniería Civil, PUCP, Lima, Perú.
- Casaverde L. y Vargas J. (1980): *Zonificación Sísmica del Perú*, II Seminario Latinoamericano de Ingeniería Sismorresistente, OEA y PUCP Lima, Perú.
- Castillo, J. y J. Alva, (1993): *peligro Sísmico en el Perú*. Tesis para optar el título profesional de Ingeniero Civil – UNI, Lima, Perú.
- Cahill, T. y Isacks, B. (1992). *Seismicity and shape of the subducted Nazca plate*. *J. Geophys. Res.*, 97, 17.503-17.529.
- Chávez-García, F.J., Stephenson, W.R. y Rodríguez, M.(1999). *Lateral propagation effects observed at Parkway, New Zealand. A case history to compare 1D vs 2D site effects*, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 89, 718-732.
- Cornell, A. (1968): *Engineering Seismic Risk Analysis*. *Bull. Of the Seismological Society of America.*, Vol-58, N°5, pp.1538-1606.
- Cornou, C., Guéguen, P, Bard, P.-Y. and E. Haghshenas (2004). *Ambient noise energy bursts observation and modeling: Trapping of harmonic structure-soil induced–waves in a topmost sedimentary layer*, *Journal of Seismology*, 8, 4, 507–524, 2004.

- Croce F.A., Lince, F., Gimenez, M., Martinez, M.P., Ruiz, F. (2009). Estimacion de profundidades del complejo plutonico Navarrete mediante procesamiento gravimetrico. *GEOACTA* 34, 1-8. Issn 1852-7744
- DeMets C., R. Gordon D.F., Argus and Stein S. (1994): Effect of recent revisions to the geomagnetic reversal time scale on estimates of current plate motions. *Geophys. Res. Lett.* 21, 2191-2194.
- Dimaté, C., Drake, C., Yepez, H. y Ocola, L. (1999): Seismic hazard assessment in the northern Andes (Pilot Project), *Annali di Geofísica*, V42, N6, pp1039-1055.
- Engdahl, E.R., and A. Villaseñor (2002): Global Seismicity: 1900-1999, in W.H.K. Lee, H.
- Kanamori, H. (1977). The energy release in great earthquakes. *J. Geophysical Research.* 84:1049-106. Doi:10.1029/JB082i020p02981.
- Esteva, L (1968). Bases para la formulación de decisiones de diseño sísmico. Tesis doctoral, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México.
- Fäh, D., Stamm, G. and Havenith, H. (2008). Analysis of three-component ambient vibration array measurements. *Geophys. J. Int.* (2008) 172, 199–213. doi: 10.1111/j.1365-246X.2007.03625.x
- Foti, S., Sambuelli, L., Socco, L. V. & Strobbia, C. (2003). Experiments of joint acquisition of seismic refraction and surface wave data. *Near Surface Geophysics*, 1:119–129.
- Foti, S., Lancellota, R., Socco, L. V., & Sambuelli, L. (2001). Application of FK analysis of surface waves for geotechnical characterization. *Proc. 4th International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, Paper No. 1.14. San Diego, California.
- Foti S, CG. Lai, GJ. Rix, C. Strobbia (2014) Surface wave methods for near-surface site characterization. CRC Press, Boca Raton.
- Gamarra. C. y Z. Aguilar (2009). Nuevas fuentes sismogénicas para la evaluación del peligro sísmico y generación de espectros de peligro uniforme en el Perú. CISMID, UNI, Lima, Perú.
- Giardini, D., Dimaté, C., Hanka, W. (1999): Pilot Project for Regional Earthquake Monitoring and Seismic HAZard Assessment, Final Report, EC DGXII CII\*-CT94-0103.
- GEOPSY (2012). Geopsy.org geophysical research and applications packages. IS Terre, Grenoble, France), [www.Geopsy.org](http://www.Geopsy.org).
- Gómez, JC; Ortiz, S. y Chiroque, C. (2013). Informe técnico. Geología y geotecnia de la ciudad de Ica. IGP.52pp.
- Gonzales, M.A. (2014). La Laguna de Huacachina: Historia, Morfología y Arquitectura. Facultad de Arquitectura y Urbanismo. Pontificia Universidad Católica del Perú. <https://issuu.com/magc04/docs/huacachina>.
- Gupta, V.K. and Ramani, N. (1980). Some aspects regional-residual separation of gravity

- anomalies in a Precambrian terrain. Geophysics, v. 45, nro.9, 1412-1426.*
- Hinze, w. (2005). *New standards for reducing gravity data. The North American gravity database. GEOPHYSICS, vol. 70, N° 4, J25-J32 pg.*
- Herrmann, R. B., and C. J. Ammon, 2002, *Computer programs in seismology version 3.20: Surface waves, receiver functions, and crustal structure, St. Louis University, Missouri. Available at <http://mnw.eas.slu.edu/People/RBHerrmann>.*
- INEI (2016). *Síntesis Estadística de la Población del Perú. Instituto Nacional de Estadística e Informática:*
- INDECI (2007). *Reporte del sismo del 2007. Instituto Nacional de Defensa Civil.*
- IGP ( 2018). *Mapa sísmico 1960 – 2017. Instituto Geofísico del Perú.*
- Kanai, K., T. Tanaka and K. Okada (1954). *Bull. Earthq. Res. Inst., 32 (1954), 199 pp.*
- Kanai, K. and T. Tanaka, (1961). *On microtremors. VIII, Bull. Earthquake Res. Inst. Tokyo Univ., 39,97-114*
- Kane, M.F., (1962). *A Comprehensive System of Terrain Corrections Using a Digital Computer. Geophysics, v. 27, 4 455-462.*
- Kvaerna, T. and Ringdahl, F. (1986). *Stability of various fk estimation techniques. Norsar semiannual technical summary, 1:1–86.*
- Konno, K., Ohmachi, T. (1998). *Ground-Motion characteristics estimated from spectral ratio between horizontal and vertical components of microtremor. Bull. Seism. Soc. Am., 88, 228-241.*
- Lacoss, R., Kelly, E., and Toksöz, M. (1969). *Estimation of seismic noise structure using arrays. Geophysics, 34(1):21–38.*
- Lermo, J., Chavez-García, F.J. (1993). *Site effect evaluation using spectral ratios with only one station. Bull. Seism. Soc. Am., 83, 1574-1594.*
- Leyton, F., Sepúlveda, S., Astroza, M., Rebolledo, S., González, L., Ruiz, S., Foncea, C., Herrera, M., and Lavado, J. (2010). *Zonificación sísmica de la cuenca de Santiago, Chile. In Congreso Chileno de Sismología e Ingeniería Antisísmica, X Jornadas, Páginas 22–27.*
- León W. y Torres V. (2001). *Mapa geológico actualizado del cuadrángulo de Ica (29 - i). INGEMMET, DGR.*
- Leyva, R. (2004), *“Obtención de las curvas de isoperiodo de la zona conurbana Veracruz-Boca del Río”. Tesis de Maestría, Universidad Veracruzana - México.*
- Marocco, R. (1980). *Géologie des Andes péruviennes: Un segment E-W de la chaîne des Andes péruviennes: la déflexion d’Abancay. Etude géologique de la Cordillère Orientale et des Hauts Plateaux entre Cuzco et San Miguel. Sud du Pérou. Doc. Orstom 94.*

- Mitma, G.J. (2001) *Microzonificación de la ciudad de Ica frente a sismos e Inundaciones. Tesis de grado, Facultad de Ing. Civil, Universidad Nacional de Ingeniería.*
- McGuire R. (2004). *Seismic hazard and risk analysis, Earthquake Engineering Research Institute (EERI), Oakland CA, EEUU, EERI, 221pp.*
- Nagy, D., (1966). *The Gravitational Attraction of a Right Rectangular Prism. Geophysics, v. 31, nro. 2362-371.*
- Nakamura, Y. (1989). *A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. Quarterly Reports of the Railway Technical Research Institute, 30, 25–33.*
- Nakamura, Y. (2000). *Clear Identification of Fundamental Idea of Nakamura's Technique and its applications in the hill zone of México City, Bull. Seism. Soc. Am. 82, 24-43.*
- Nogoshi M and Igarashi T. (1971). *On the amplitude characteristics of microtremor (part 2). J Seismol Soc Jpn 1971;24:26–40. (in Japanese with English abstract).*
- Norabuena, E., Dixon, T., Stein, S., Harrison, C.G.A. (1999): *Decelerating Nazca–South America and Nazca–Pacific motions. Geophys. Res. Lett. 26, 3405–3408.*
- Ocola, L. (2010): *Mapa Preliminar de Peligro Sísmico: Aceleraciones Sísmicas. Atlas de Peligros Naturales 2010, INDECI, pp210-211.*
- Olivares, P., Taype, V. y Castro, J. (1994) *Estudio geodinámico de la cuenca del río Ica, Dep. de Ica-Huancavelica. Inf. Técnico de INGEMMET, 132pp.*
- Okada, H. (2003). *The microtremors survey method, Geophysical Monograph Series 12, Soc. Of Expl. Geophys. Japan, 155 pp.*
- Ordaz, M., A. Aguilar, J. Arboleda (2007): *Program for computing seismic hazard: CRISIS-2007 V1.1., Institute of Engineering, UNAM, Mexico*
- Park, C. B., Miller, R. D., Xia, J., & Ivanov, J. (2007). *Multichannel analysis of surface waves (MASW)—active and passive methods. The Leading Edge, 26 (1), 60–64.*
- Park, C. B. and Miller, R. D. (2008). *Roadside passive multichannel analysis of surface waves (masw). Journal of Environmental & Engineering Geophysics, 13(1):1–11.*
- Park, C.B. (2014). *MASW for geotechnical site investigation. The Leading Edge, 32(6):656-662.*
- Pilz, M., Parolai, S., Picozzi, M., Wang, R., Leyton, F., Campos, J., and Zschau, J. (2010). *Shear wave velocity model of the santiago de chile basin derived from ambient noise measurements: a comparison of proxies for seismic site conditions and amplification. Geophysical Journal International, 182(1):355–367.*
- PNUD ( 2007): *Plan de usos del suelo ante desastres y medidas de mitigación de las ciudades de Ica, Parcona, La Tinguiña, Subtanjalla y San José de los Molinos. Proyecto INDECI PER/02/051 Ciudades sostenibles.*

- Reinoso, E. (2000), "Estudios para la Microzonificación". Memorias del VI Simposio Ncional de Ingeniería Sísmica y II reunión sobre la Enseñanza de la Ingeniería Sísmica en México. Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica, A.C.
- Roma, V.(2010). Seismic geotechnical site characterization by means of MASW and ReMi methods. *FastTIMES*, 15(3):16-28.
- Rosell., J. (2002). Vulnerabilidad en la Ciudad de Ica. III Curso internacional microzonificación sísmica y su aplicación en la mitigación de desastres. Instituto Nacional de Desarrollo.
- Sánchez-Sesma, F. J., Palencia, V. J., Luzón, F. (2002). Estimation of local site effects during earthquakes: an overview. *ISSET Journal of Earthquake Technology*, 39:3, 167-193.
- Sauter, F. (1989), "Introducción a la sismología", *Fundamentos de Ingeniería Sísmica I*. Editorial Tecnológica de Costa Rica, 271pp.
- Sebrier, M. Huaman, D., Blanc, J., Machare, J., Bonnot, D. y Cabrera, J. (1985). Observaciones acerca de la neotectónica del Perú. IGP-LGDI. Proy. SISRA, Grupo peruano de neotectónica, 96 pp.
- SESAME (2009). Project EVG1-CT-2000-00026. <http://sesame-fp5.obs.ujf-grenoble.fr/Deliverables/Del-D19-Wp06.pdf>.
- Semblat, J.F., P. Dangla, M. Kham (2002) Seismic site effects for shallow and deep alluvial basins: In-Depth motion and focusing effect. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 22 (9-12), Pages 849-854.
- Spector, A. y Grant, F.S., 1970. Statistical models for interpreting aeromagnetic data. *Geophysics*, 35:293-302.
- Spence, W., Mendoza, C., Engdahl, E. Y Choy, L. (1998) Seismic subduction of the Nazca ridge as shown by the 1996 and 1997 Peru earthquakes. *PAGEOPH*
- Socco LV, Foti S, Boiero D (2010) Surface-wave analysis for building near-surface velocity models—established approaches and new perspectives. *Geophysics* 75(5):75A83–75A102.
- Tavera, H., y Bernal, I. (2008). The Pisco Peru earthquake of August 15th. *Seismological Research Letters*, Volume 79, Number 4 July/August 2008.
- Tavera, H., Bernal, I., Stresser, F., Arango-Gavina, M., Alarcon, J., Bommer, J. (2008). Ground Motions observed during the 15 August 2007 Pisco, Peru, event. *Bulletin of Earthquake Engineering*, DOI:10.1007/s10518-008-9083-4X.
- Tavera, H., I. Bernal, C. Condori, M. Ordaz, A. Zevallos y I. Oscar ( 2014) Re-evaluación del peligro sísmico probabilístico para el Perú. Proyecto en Cooperación con el Banco Mundial. 91 pp.

- Tavera, H. y Buforn, E. (2001). Source mechanism of earthquake in Peru, *Journal of Seismology* 5:519-539.
- Tokimatsu K., Miyadera Y. and Kuwayama S. (1992a), Determination of Shear Wave Velocity Structures from Spectrum Analyses of Short-Period Microtremors, *Proc., 10th World Conf. on Earthquake Eng.*, 1, , 253-258.
- Villegas-Lanza, J.C.; Chlieh, M., Cavalie, O., Tavera, H.; Baby, P., Chire-chira, J. and Nocquet, J.-M. (2016). Active tectonics of Peru: Heterogeneous interseismic coupling along the Nazca megathrust, rigid motion of the Peruvian Sliver, and Subandean shortening accommodation. *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 121, doi:10.1002/2016JB013080.
- Wathelet, M. (2005a). Array recordings of ambient vibrations: surface-wave inversion. *Liège University (Belgium)*.
- Wathelet, M. (2005b). Geopsy geophysical signal database for noise array processing. Software, LGIT, Grenoble, France.
- Wathelet, M. (2008). An improved neighborhood algorithm: Parameter conditions and dynamic scaling. *Geophysical Research Letters*, 35(9):L09301.
- Wathelet M, Jongmans D, Ohrnberger M (2004) Surface-wave inversion using a direct search algorithm and its application to ambient vibration measurements. *Near Surf Geophys* 2:211–221
- Wathelet M, Jongmans D, Ohrnberger M, Bonnefoy-Claudet S (2008) Array performance for ambient vibrations on a shallow structure and consequences over vs inversion. *J Seism* 12:1–19. doi:10.1007/s10950-007-9067
- Xia, J., Miller, R. D., and Park, C. B., 1999, Estimation of near-surface shear-wave velocity by inversion of Rayleigh wave: *Geophysics*, 64, 691–700, this issue.
- Zywicki, D. J. (1999). *Advanced Signal Processing Methods Applied to Engineering Analysis of Seismic Surface Waves*.